

Optimierung der Strömungsverhältnisse zur Reduzierung der  
Ansatzbildung im IS-Ofen

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

**DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor – Ingenieur

Dr.-Ing.  
(Kurzform)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Vsevolod Roumiantsev

geboren am 12.05.1978 in Moskau, Russland

Gutachter.: Prof. Dr.-Ing. Michael Stelter, Freiberg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg  
Dr. rer. nat. Bruno Schwab, Duisburg

Tag der Verleihung: 5 März 2004

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Stipendiat des Graduiertkollegs „Transportvorgänge in porösen Systemen der Verfahrens- und Geotechnik“ am Institut für NE-Metallurgie und Reiststoffe der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

An dieser Stelle möchte ich mich bei Allen bedanken, die mich während meiner Forschungsarbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Stelter für die wissenschaftliche Betreuung bei der Bearbeitung des Themas, seine ständige Diskussionsbereitschaft sowie die freundliche Unterstützung bei der Anfertigung der Dissertation.

Besonders herzlich möchte ich Herrn Bernd Freiwald danken, der mit seinem Engagement einen hohen Anteil am Erfolg hatte.

Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. G. Morgenstern für die gute Zusammenarbeit und seine persönliche Anteilnahme.

Außerdem möchte ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanken.

# Inhaltverzeichnis

<b>1. Einleitung und Aufgabenstellung</b> .....	6
<b>2. Literaturlauswertung</b> .....	8
2.1. Grundprinzip des Imperial Smelting ( IS ) Verfahrens.....	8
2.1.1. Thermische Zinkgewinnung.....	8
2.1.2. IS–Verfahren.....	9
2.2. Ansatzbildung.....	12
2.2.1. Ansatzbildung im IS-Ofen.....	12
2.2.2. Ursachen der Ansatzbildung.....	14
2.2.2.1. Zinkreoxidation.....	14
2.2.2.2. Einfluss des Bleis auf die Ansatzbildung.....	16
2.2.2.3. Zusammensetzung der Beschickung.....	18
2.2.2.4. Beitrag der Strömungsverhältnisse zur Ansatzbildung.....	19
2.2.3. Zinkverluste durch Ansatzbildung.....	20
2.3. Präzisierung der Aufgabenstellung.....	20
<b>3. Physikalische Modellierung des IS-Ofens</b> .....	24
3.1. Modellierung der pyrometallurgischen Prozesse.....	24
3.2. Grundlagen der Simulation.....	26
3.3. Ähnlichkeitskennzahlen.....	27
3.4. Annahmen.....	29
3.5. Auswahl der Größe und Dimensionierung der Modellanlage.....	29
<b>4. Möglichkeiten zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten</b> .....	31
4.1. Flügelrad-Anemometrie.....	31
4.2. Konstant-Temperatur-Anemometer ( KTA ).....	31
4.3. Laser-Doppler-Anemometrie ( LDA ).....	32
<b>5. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung</b> .....	37
5.1. Modellaufbau.....	37
5.2. Aufbau des Laser-Doppler-Anemometers.....	38

<b>6. Ergebnisse der Strömungsmessungen im Modell des IS-Ofens.....</b>	<b>40</b>
6.1. Strömungsuntersuchungen ohne Sekundärluft.....	40
6.2. Erläuterung der untersuchten Bedingungen vom Einblasen des Gichtwindes.....	41
6.2.1. Gichtwinddüseneinstellung im Originalofen und im Modell.....	41
6.2.2. Berechnung des Gichtwindvolumens.....	43
6.3. Strömungsuntersuchungen beim Einblasen von Sekundärluft.....	45
6.3.1. Strömungsergebnisse bei unterschiedlichen Positionen der Gichtwinddüsen..	45
6.3.2. Strömungsergebnisse bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Gichtwinddüsen.....	52
6.3.3 Strömungsergebnisse bei unterschiedlichen Gichtwindvolumina.....	65
6.3.4 Strömungsergebnisse bei kombinierten Einstellungen der Gichtwinddüsen...	78
<b>7. ChemSage-Modellierung.....</b>	<b>84</b>
7.1. Modellbeschreibung.....	84
7.2. Ergebnisse der Berechnungen.....	86
<b>8. Untersuchungen der Ansätze.....</b>	<b>98</b>
8.1. Beseitigung der Ansätze.....	99
8.2. Probenahmestellen.....	101
8.3. Die Ergebnisse der chemischen und der röntgenographischen Untersuchungen.....	103
8.4. Die Ergebnisse der chemischen und der röntgenographischen Untersuchungen der Ansatzschichten.....	109
8.5. Die Ergebnisse der Härtemessungen.....	115
8.6. Berechnung der Materialverluste durch Ansatzbildung im Originalofen.....	117
8.7. Berechnung der Wärmeverluste durch Bleiaustrag aus dem Kondensator.....	118
<b>9. Nebelabscheidung.....</b>	<b>121</b>
9.1. Nebelabscheidung im Modell.....	121
9.2. Beschreibung der Abscheidung bei verschiedenen Gichtwindvolumina.....	123
9.3. Beschreibung der Abscheidung an der Vorderwand des Modells.....	125
9.4. Beschreibung der Abscheidungen bei der kombinierten Einstellung der Gichtwinddüsen.....	127



<b>10. Fehlerbetrachtung</b> .....	129
<b>10.1.</b> Fehler infolge partieller Ähnlichkeit.....	129
<b>10.2.</b> Fehlerabschätzung der Einflussgrößen.....	129
<b>10.3.</b> Fehlerbetrachtung zu den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten.....	129
<b>10.4.</b> Fehlerbetrachtung zu den Untersuchungen der Ansätze.....	130
<b>10.5.</b> Fehlerbetrachtung zu den thermodynamischen Berechnungen.....	131
 <b>11. Vorschläge zur Optimierung der IS-Anlage</b> .....	132
<b>11.1.</b> Einstellung der Gichtwindzuführung.....	132
<b>11.2.</b> Gestaltung des Überganges zwischen Ofen und Kondensator.....	134
<b>11.3.</b> Wirtschaftliche Betrachtung.....	135
 <b>12. Zusammenfassung</b> .....	137
 <b>Literaturverzeichnis</b> .....	142
 <b>Bilderverzeichnis</b> .....	148
 <b>Tabellenverzeichnis</b> .....	152
 <b>Symbolverzeichnis</b> .....	153
 <b>Anhang</b> .....	155

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

Der Imperial Smelting-Prozess ist ein pyrometallurgisches Verfahren zur gleichzeitigen Gewinnung von Zink und Blei. Einsatzmaterialien sind nicht nur primäre zink- und bleihaltige Erze sondern auch Sekundärrohstoffe. Bei diesem Verfahren wird Zink reduziert, verdampft und mit den Ofengasen in den Kondensator abtransportiert und dort kondensiert. Im oberen Teil des Ofens wird der Heißwind über die Gichtwinddüsen eingeblasen. Dadurch kann die Rückoxidation von Zn verringert werden.

Im praktischen Ofenbetrieb kommt es im Bereich des Glockenverschlusses und am Übergang in den Abgaskanal zu einer verstärkten Ansatzbildung. Dies führt zu Problemen beim Betrieb der Imperial Smelting-Anlage. Die Ansätze verschlechtern die Durchgasung der IS-Anlage, in dessen Folge verlassen die Reaktionspartner den Ofen unausgenutzt. Dadurch wird der Wirkungsgrad des Prozesses verringert. Die heute verwendeten Methoden zur Beseitigung der Ansätze sind uneffektiv und nehmen sehr viel Zeit und Geld in Anspruch.

Das Einblasen von Gichtwind ( Heißwind 750-800 °C ) ermöglicht die Verbrennung eines Teiles des aus dem Ofen austretenden Kohlenmonoxides. Dadurch wird die Gichtgastemperatur auf einem Niveau von 1000-1020 °C gehalten. Über die Erhöhung der Temperatur im Oberofen wird die Rückoxidation des Zinks vermindert [ 1 ].

Bei der Optimierung von metallurgischen Prozessen und bei der Entwicklung von neuen Verfahren sind Stoff- und Wärmeaustausch, die wesentlich durch die Strömungsverhältnisse beeinflusst werden, besonderes wichtig. Zu berücksichtigen sind speziell die Bedingungen, unter denen sich Ansätze bilden können [ 2 ]. Die Bedeutung der Strömung im IS-Hochofen und das Interesse an den inneren Vorgängen geben den Anlass, die Strömungsvorgänge im oberen Ofenbereich hinsichtlich der Ansatzbildung näher zu untersuchen. Durch die Ermittlung und die Auswertung von Strömungsprofilen können Aussagen

- zur Verbesserung des Wirkungsgrades des Verfahrens
- zur Verringerung des Wachstums der Ansätze
- zur Optimierung der Prozessparameter

abgeleitet werden.

Solche Messungen sind an der Originalanlage wegen hoher Arbeitstemperatur, fehlender geeigneter Messsysteme, aggressiver Ofenmedien und u.a. nur mit riesigem Aufwand realisierbar [ 3 ]. Die pyrometallurgischen Aggregate sind für direkte Untersuchungen der Strömungsverhältnisse in der Gasphase ungeeignet. Die Lösung dieser Probleme ist möglich, wenn die Vorgänge im Ofen ( gasdynamisch und chemisch ) an Hand eines Modells

nachgebildet werden. Die entsprechenden Untersuchungen sind also auch mit geringeren Kosten und kürzeren Entwicklungszeiten verbunden. Es gibt eine Reihe mit Wasser oder organischen Substanzen arbeitender Modellanlagen, welche die komplexen Wechselwirkungen in der Badschmelze einfach erfassen und sichtbar machen können [ 4, 5 ]. Um die in der Gasphase ablaufenden Vorgänge zu beschreiben, wurden hauptsächlich mathematische Modelle eingesetzt [ 6 ]. Die vorliegende Arbeit soll zeigen, dass die Simulation der Strömung der Gase eines pyrometallurgischen Prozesses mittels eines physikalischen Modells realisierbar ist.

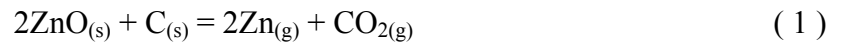
Aufgabenstellung ist dabei die Modellierung der Strömungsverhältnisse in einem metallurgischen Aggregat am Beispiel des Imperial Smelting-Ofens. Dabei wird ein thermisches Verfahren im Labormaßstab in einem „kalten“ mit der Umgebungsluft betriebenen Modell simuliert. Während der Erfassung der Gasgeschwindigkeitswerte soll man auf die Arbeitsweise des Aggregates und die Ähnlichkeitstheorie achten, damit die erhaltenen Ergebnisse auf das Original übertragen werden können. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden der Einfluss der technologischen Parameter wie Gichtwindvolumen, Position und Neigung der Düsen auf die Strömungsverhältnisse im Modell untersucht. Während der Experimente werden die Strömungsprofile in einem der Imperial Smelting Originalanlage geometrisch ähnlichen Ofenmodell bei Raumtemperatur aufgenommen und unterschiedliche Einstellungen der Gichtwinddüsen getestet. In Verbindung mit parallel dazu durchgeführten Untersuchungen der Ansatzproben, Berechnungen mit ChemSage u.a., sollen Aussagen zu einer effektiveren Einblasttechnologie, die zur Reduzierung der Ansatzbildung im Imperial Smelting-Ofen führen können, getroffen werden. Die bestehenden Betriebsbedingungen müssen also auch genauer definiert werden. Daraus können konstruktive sowie verfahrenstechnische Maßnahmen zur Verbesserung von IS-Prozessen hergeleitet werden.

## 2. Literaturlauswertung

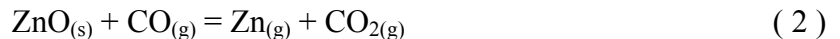
### 2.1. Grundprinzip des IS-Verfahrens

#### 2.1.1. Thermische Zinkgewinnung

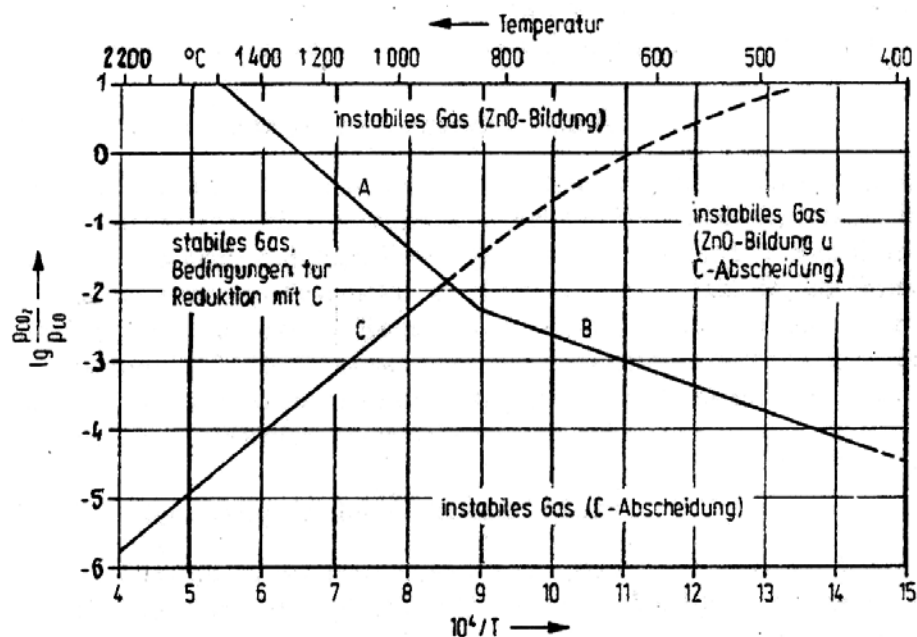
Die Zinkerzeugung erfolgt hauptsächlich in Elektrolysen. Auf trockenem Wege wird das Metall nach dem Imperial Smelting-Prozess gewonnen. Alle andere Verfahren ( liegende und stehenden Muffel, elektrothermische Verfahren ) sind entweder nicht mehr in Anwendung oder nur noch in unwesentlichem Maße an der Weltproduktion beteiligt [ 1 ]. Die thermische Zinkerzeugung bedient sich durchweg der Reduktion des Oxides durch Kohlenstoff. Dieser Prozess erfolgt hauptsächlich durch CO. Bei der Reduktion findet eine direkte Umsetzung zwischen den Feststoffen ZnO und Kohlenstoff nur im sehr untergeordneten Maße statt [ 7 ].



Es wurde festgestellt, daß die Reaktion in zwei Teilreaktionen verläuft:



Das gebildete CO<sub>2</sub> wird von überschüssigem Kohlenstoff erneut zu CO reduziert. Weil die Boudouard-Reaktion bei den Arbeitstemperaturen der Technik ( unterhalb 1050 °C ) langsamer verläuft, ist sie damit der geschwindigkeitsbestimmende Schritt. Daraus ergibt sich für die praktische Durchführung der Zinkgewinnung, daß mit einem Überschuß an Kohlenstoff und bei einer Temperatur weit oberhalb des Siedepunktes von Zink ( 908 °C ) gearbeitet werden muss [ 8 ].



**Bild 1:** Phasengleichgewichte in Abhängigkeit vom CO/CO<sub>2</sub>-Verhältnis und der Temperatur;

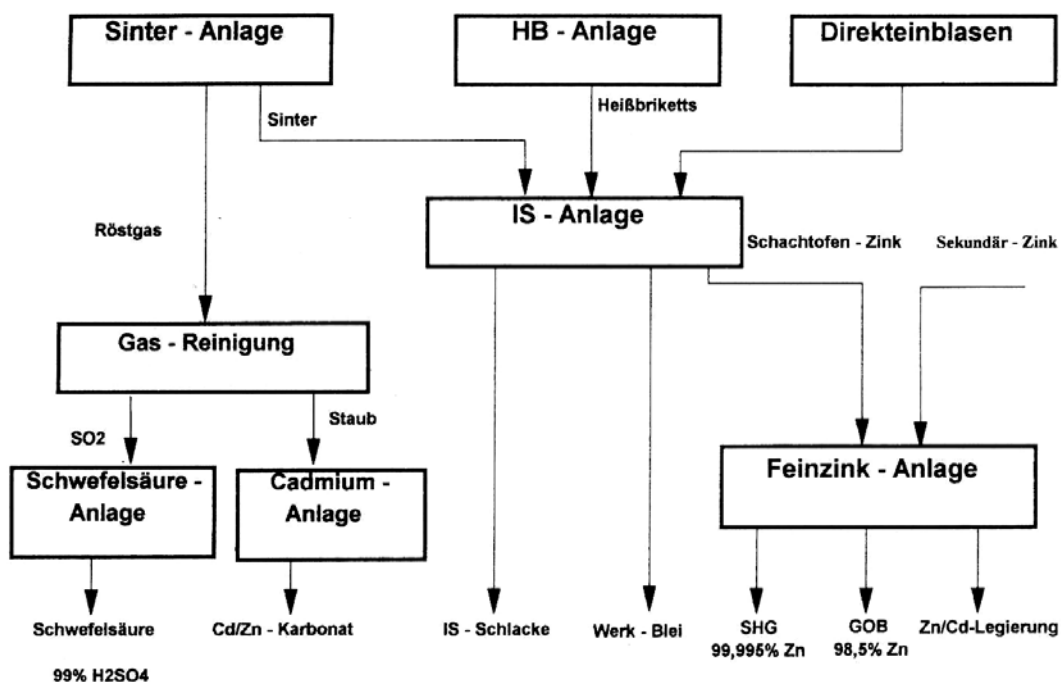
$p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{Zn}} = 1 \text{ bar}$ ; [ 7 ]

Bild 1 zeigt einen Überblick über die Phasengleichgewichte in Abhängigkeit vom  $\text{CO}_2/\text{CO}$ -Verhältnis und der Temperatur bei Gegenwart von überschüssigem Kohlenstoff.

Die Linie A entspricht der Reaktionsgleichung ( 1 ), die Linie B wie A, jedoch für flüssiges Zink, die Linie C dem Boudouardgleichgewicht. Die Reduktion von  $\text{ZnO}$  durch  $\text{CO}$  erfolgt nur unter den Bedingungen im Feld links der beiden Kurvenäste A und C. Die niedrigste Prozesstemperatur durch laufende Regenerierung von  $\text{CO}$  unter Bildung von  $\text{Zn}$ -Dampf liegt bei ca.  $900\text{ }^\circ\text{C}$  am Schnittpunkt der beiden Kurvenäste A und C.

### 2.1.2. IS-Verfahren

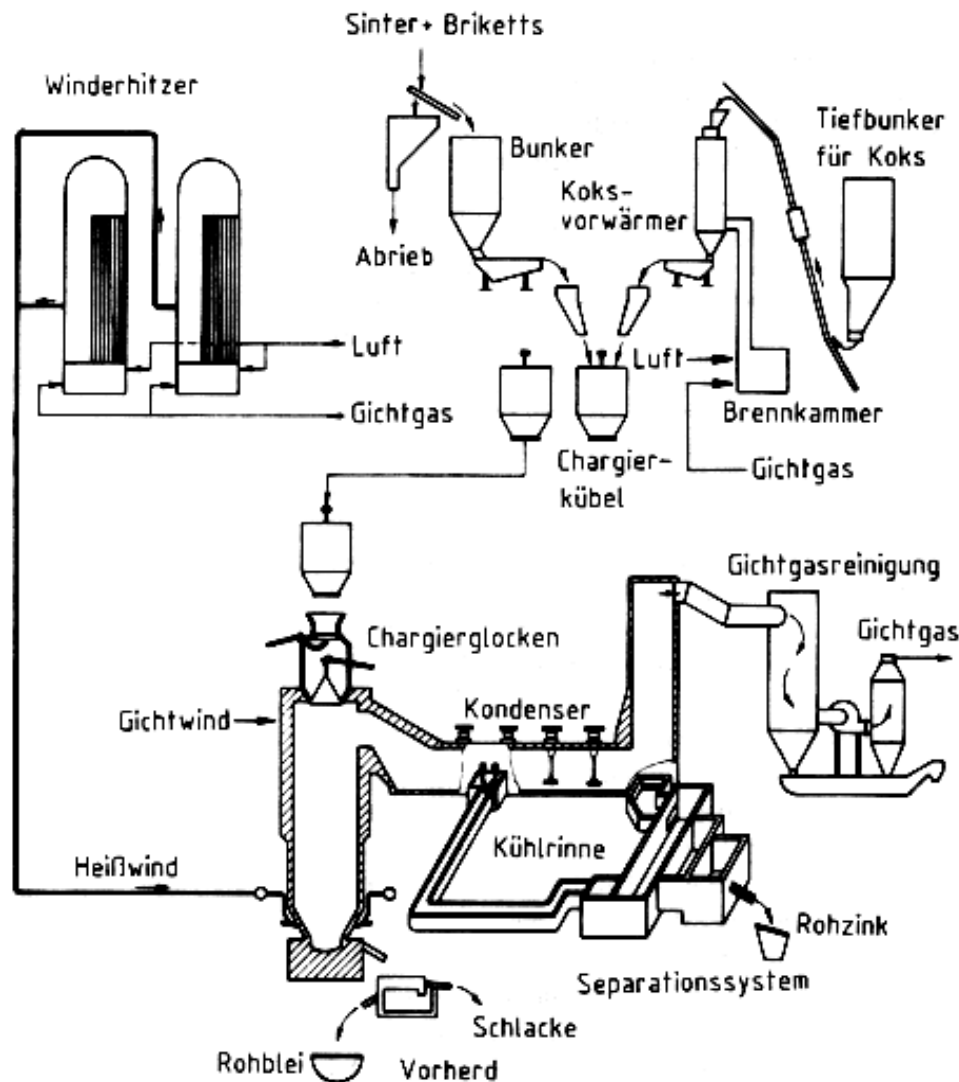
Das Verfahren wurde von Imperial Smelting Proc. in Großbritannien in den vierziger und fünfziger Jahren für die Verarbeitung von zink- und bleihaltigen Vorstoffen entwickelt [ 9, 10 ]. Es unterscheidet sich vom allen anderen thermischen Zinkgewinnungsverfahren dadurch, daß Zink und auch Blei in einem Gebläseschachtofen in einem Arbeitsgang mit hohen Durchsatzleistungen gewonnen werden.



**Bild 2:** Schema der IS-Anlage; [ 11 ]

Der erste größere Ofen ging 1960 in Swansea in Betrieb. Er hatte eine Höhe von 10 m, eine Düsenebene von  $14\text{ m}^2$  und einen Schachtquerschnitt von  $17,2\text{ m}^2$ , der auch heute noch als Normalgröße gilt. Seine Leistung betrug 35000 t Zink pro Jahr [ 9 ]. Heute ist eine typische IS-Hütte bei 310– 320 Betriebstagen auf die Produktion von rund 100000 t Zink und 35000 bis 40000 t Werkblei ausgelegt. Die Leistungssteigerung ohne Vergrößerung der

Abmessungen der Öfen wurde vor allem durch Erhöhung der Windbelastung möglich. Als Koppelprodukt fallen dabei, in Abhängigkeit vom Schwefelgehalt der verarbeiteten Vorstoffe, 120000 bis 160000 t/a Schwefelsäure an. In Duisburg – dem Standort der einzigen deutschen IS-Hütte – liegt die Schwefelsäureproduktion auf Grund des hohen Sekundärstoffanteils von 50 % bei rund 125000 t/a. Bild 3 zeigt die Gesamtanlage eines IS-Schachtofens [ 11 ].

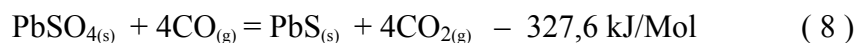
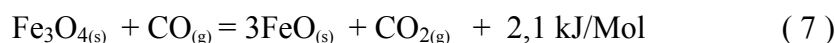
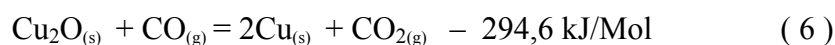
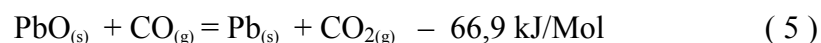
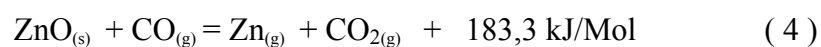


**Bild 3:** Schematische Darstellung des IS-Schachtofenprozesses [ 7 ]

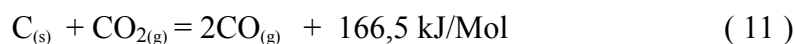
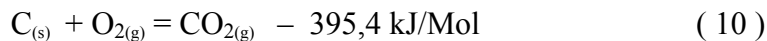
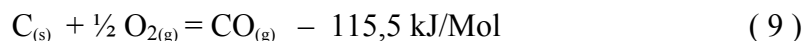
Die Abröstung und Agglomerierung der Zink- und Bleierze, sowie Mischkonzentrate erfolgt auf Dwight-Lloyd-Apparaten nach dem Drucksinterverfahren. Die Beschickung des Ofens besteht aus auf 800° C vorgewärmtem Koks mit 60–90 mm Korngrößen und möglichst heißem Sintergut mit Korngrößen nicht unter 15 mm und Gehalten um 42–46 % Zn, 10–22 % Pb, 0,6–1,7 % Cu, 8–15 % CaO und 5–12 SiO<sub>2</sub> [ 7 ]. Sie wird durch einen gasdichten Glockenverschluß zugegeben. In neuerer Zeit werden zunehmend Sekundärvorstoffe, Wälzoxid, Stäube und Aschen, mitverarbeitet. Zum Stückigmachen werden die feinkörnigen

Vorstoffe nach Vorwärmung im Drehrohfen auf 400–600° C in einer Walzenbrikettiermaschine heißbrikettiert und nach Luftkühlung über ein Band der Beschickungsanlage des Schachtofens zugeführt. Die Zugabe von Sekundärstoffen kann über 35 % des Schachtofeineinsatzes erreichen [ 13, 14 ]. Um die Rückoxidation von Zn zu minimieren wird in den oberen Bereich des Ofens Heißwind über vier Gichtwinddüsen eingeblasen, damit die Temperatur von ca. 1000 °C gehalten wird. Der Gebläsewind wird in gichtgasbeheizten Luftvorwärmern auf 600–700 °C oder in Cowper-Winderhitzern auf 950–1000° C vorgewärmt [ 1, 7, 9, 10, 11 ]. Die grundlegenden Gleichungen für die Umsetzungen im Ofenschacht sind:

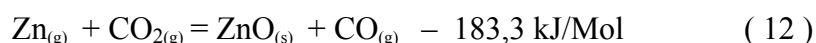
Reduktion der Oxide und Sulfate



Verbrennung des Kohlenstoffs



Rückoxidation des gasförmigen Zinks



Die Reaktionen ( 4, 5, 11 ) spielen eine entscheidende Rolle [ 1, 7, 15 ]. Auf die Vorgänge in dem über der Düsenebene liegenden Teil des Ofenschachtes, in dem die Schlacke geschmolzen und reduziert wird, hat die Dynamik der Gasbewegung erheblichen Einfluß. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird hier in der ersten Linie durch die Ausbildung des mit der Schlacke in Berührung stehenden Gasfilms kontrolliert. Bei den in diesem Teil herrschenden Temperaturen ist die Geschwindigkeit der Boudouard-Reaktion hoch genug, um nicht geschwindigkeitsbestimmend für den Gesamtablauf zu sein. Zum Wärmetransport in die höher gelegenen Zonen des Ofens tragen auch gewisse Mengen Pb und PbS bei, die hier in den heißesten Zonen verdampfen und in den höheren Bereichen des Schachtes wieder kondensieren. In diesen Zonen wird Zink von Koks bei erheblichem Wärmeverbrauch unter gleichzeitiger Regenerierung von CO reduziert [ 16 ].

Die Erwärmung der hoch liegenden Zone der Charge führt zur Abkühlung des aus der Gleichgewichtszone nach oben strömenden Gasgemisches unter die

Gleichgewichtstemperatur und damit zur Rückoxidation von Zn-Dampf. Außerdem entsteht noch Kohlendioxid durch die Reduktion von z.B.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [ 7, 17 ]. Die Untersuchungen des Reaktionsmechanismus haben gezeigt, daß die Oxidation von Zn-Dampf nicht in der homogenen Gasphase stattfindet, sondern nur nach Adsorption von Zink an festen Oberflächen abläuft, z.B.: an im Gichtgas mitgerissenen Staubteilchen und an dem Mauerwerk im Übergang zwischen Ofen und Kondenser. Offensichtlich wird im Blei gelöstes Zink nicht oxidiert. Die Oberfläche von Zn-Tröpfchen wird durch kondensierendes Zink vor der Oxidation geschützt [ 7, 18 ].

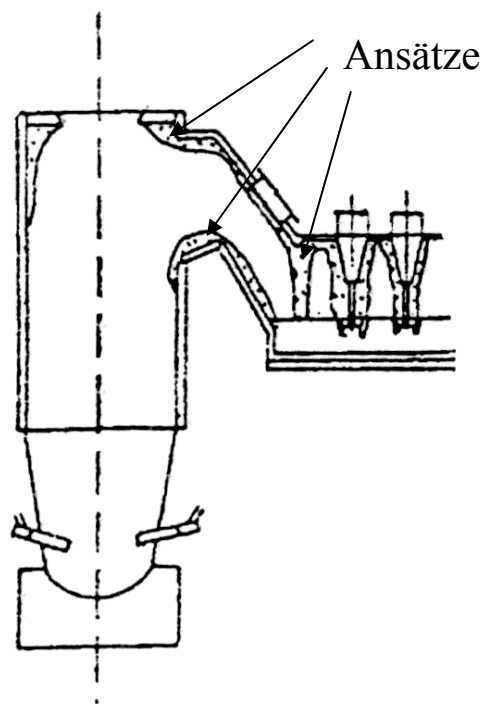
Mit ca.  $1040^\circ\text{C}$  tritt das Gas in den Kondensator ein. Es enthält 7 – 8 % Zn, 10 – 13 %  $\text{CO}_2$ , 20 – 23 % CO [ 1, 7, 11, 19 ]. Der Metalltröpfchenschauer, den in das Bleibad eintauchende Impeller erzeugen, absorbiert das gasförmige Zink und führt zur intensiven Abkühlung der restlichen Gase. Das dem Absorber mit  $450^\circ\text{C}$  und einem Zinkgehalt von 2,02 % Zn ( Sättigungskonzentration ) kontinuierlich zufließende Blei erwärmt sich hierbei auf  $560^\circ\text{C}$  und wird mit Zinkgehalten von 2,26 % Zn ( Sättigungskonzentration bei  $560^\circ\text{C}$  5 % Zn ) in ein wassergekühltes Rinnensystem gepumpt. Weil nur einer Aufnahme von 2,5 kg Zn/t Pb erreichbar ist, sind pro Tonne absorbiertes Zink ca. 400t Blei umzuwälzen. Zur Kühlung werden von oben in die Rinne eingetauchte, von Kühlwasser durchflossene Rohre in verschiedener Länge und variabler Zahl verwendet. Aus dem auf  $450^\circ\text{C}$  abgekühlten Blei scheidet sich flüssiges Zink aus, das dann in einem Seigerofen mit Überlaufwehr abgetrennt wird. Das an Zink verarmte Blei wird in den Absorber zurückgeführt. Das gewonnene Zink wird in eine Gießpfanne abgestochen, in der durch Einrühren von Natrium geringe Gehalte von Arsen entfernt werden, und enthält im Mittel 1 – 1,25 % Pb, 0,003 – 0,005 % Cu, 0,03 – 0,15 % Cd, 0,014 – 0,02 % Fe, < 0,005 % As, < 0,008 % Sn, 0,0015 % Na und 1 g/t Ag [ 2 ].

## **2.2. Ansatzbildung**

### **2.2.1 Ansatzbildung im IS-Ofen**

Die an der Wand ständig gebildeten Ansätze führen zu einer ungleichmäßigen Strömungsverteilung über den Querschnitt des IS-Ofens. Einerseits schützt die Ansatzschicht das Mauerwerk vor chemischem Angriff und mechanischem Verschleiß, andererseits kann sie bei unkontrolliertem Wachstum die Betriebsparameter des Verfahrens ( z.B. Beeinträchtigung der Schmelzleistung und darausfolgender Erhöhung des Koksverbrauchs ) stark verschlechtern [ 20 ]. Die bevorzugten Stellen des Ansatzwachstums sind bekannt. Das sind der Bereich des Glockenverschlusses, in dem die Beschickung des Ofens erfolgt, und am Übergang in den Abgaskanal ( s. Bild 4 ).





**Bild 4:** Ansatzbildung in der IS-Anlage, [ 21 ]

Die Ansätze treten hauptsächlich an der unteren Kante des Austritts im Schacht, an der Ofendecke und im Übergangsbereich zum Kondensator auf. Sie führen schon in einem früheren Stadium ihrer Bildung zu Problemen bei der Durchgasung über den Querschnitt.

Sie erstrecken sich über den gesamten Übergangsbereich und Kondensator. Ein Ansatz wächst sehr schnell heran, wenn seine Bildung erst einmal begonnen hat. In wenigen Tagen kann er solche Mächtigkeit erreichen. Die nachteiligen Auswirkungen solcher Profileinengungen auf die Ofenparameter sind bekannt: Erhöhung des spezifischen Koksverbrauchs und Verringerung des Wirkungsgrades des IS-Prozesses [ 2, 11, 22, 23 ].

Auf Grund der Härte, der relativ chemischen Trägheit und der hohen Schmelztemperaturen können die Ansätze nur bei Unterbrechung des Ofenbetriebes beseitigt werden. Zur Zeit gibt es keine effektive Methode zur Bestimmung der Ansatzbildungsstellen in Hochöfen und zur Verhinderung des weiteren Ansatzwachstums. Um den Ofenbetrieb aufrecht zu erhalten und übliche Betriebsbedingungen wieder zu erreichen, müssen die Ansätze entfernt werden. Um sie zu beseitigen muss die gesamte Anlage ( Ofen, Kondensator, Gasreinigungssystem ) regelmäßig gereinigt werden. Im Laufe der Jahre hat sich das Feststellen und Entfernen von Ansätzen zu einem schnellen und sicheren Verfahren entwickelt [ 2, 24, 25 ]. Die Beseitigung dieser Ansätze ist mehr eine Notmaßnahme, als eine gute Lösung. Die derzeit angewendeten Methoden zur Ansatzentfernung müssen unbefriedigend bleiben, solange es nicht gelingt, das Ansatzwachstum zu vermeiden bzw. deutlich einzuschränken.

### 2.2.2. Ursachen der Ansatzbildung

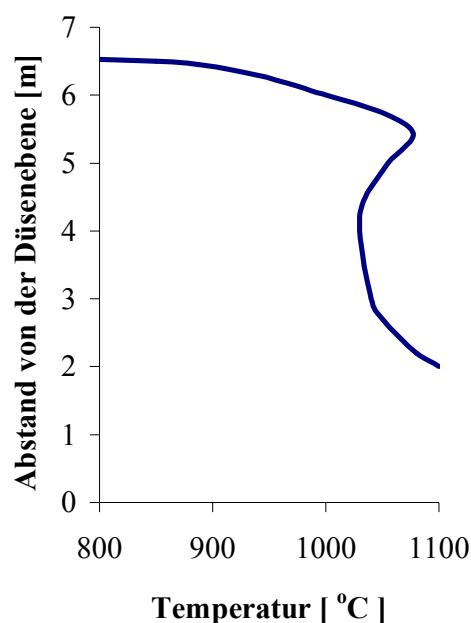
Die Ausbildung eines Ansatzes wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. Hierzu zählen die Zusammensetzungen von Reaktionsgasen, Sinter und Briketts, die Gasgeschwindigkeit und die Gichttemperatur. Das Ausmaß hängt von den Bedingungen an der jeweiligen Stelle ab. Die Gründe für die Ansatzbildung an der Hochofenausmauerung liegen in einem Zusammenwirken all dieser Parameter [ 25, 26 ].

#### 2.2.2.1.Zinkreoxidation

Eine der wichtigsten Ursache des Ansatzwachstums ist die Rückoxidation des Zinks des aus Zinkdampf,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  und  $\text{N}_2$  bestehenden Gases, das aus dem Ofenschacht in den Kondensator geht, sowie die anschließende Kondensation des Zinkoxides an den „kalten“ Ofenwänden. Folgende Zusammensetzung haben die Gichtgase des IS-Ofens [ 23 ]:

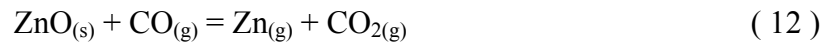
$\text{Zn}_g = 7,65 \%$ ,  $\text{CO}_2 = 8,2 \%$ ,  $\text{CO} = 24,7 \%$ ,  $\text{N}_2 = 59,45 \%$

Sie ist dadurch charakterisiert, dass die Zinkkonzentration niedrig und der  $\text{CO}_2$ -Gehalt sehr hoch ist. Nach dem Austritt aus dem Ofenschacht beträgt die Gastemperatur 850-900 °C. Das Einblasen von Gichtwind ( Heißwind 750-800 °C ) ermöglicht die Verbrennung eines Teiles des aus dem Ofen austretenden Kohlenmonoxides, welches unter den im Oberofen herrschenden Bedingungen hauptsächlich mit Sauerstoff reagiert. Dadurch wird die Gichtgastemperatur auf einem Niveau von 1000-1020 °C gehalten. Durch die Erhöhung der Temperatur im Oberofen wird die Rückoxidation des Zinks vermindert [ 27 ].

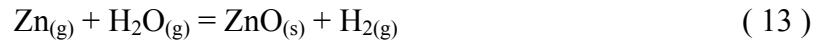


**Bild 5:** Temperaturprofil im IS-Ofen, [ 28 ]

Auf Bild 5 kann man einen Temperaturanstieg erkennen, der durch die CO-Nachverbrennung und die exotherme Reaktion zwischen Zink und Kohlenmonoxid entstanden ist. Die Rückoxidation ist eine Umkehr der wichtigsten Schachtreaktion:



Ein geringer Teil des Zinks wird durch Wasserdampf reoxidiert:



Die Reoxidation der Metaldämpfe beginnt schon bei 1012 °C für  $p_{\text{Zn}}=0,08$  und  $p_{\text{CO}_2}/p_{\text{CO}}=0,4$  [ 23 ]. Eine Reihe von Laborversuchen wurde durchgeführt, um die Bildung des Zinkoxids in einer  $\text{Zn}_{(g)}\text{-CO}_2\text{-CO-N}_2$ -Atmosphäre bei verschiedenen Temperaturen zu messen [ 29, 30, 31, 32 ]. Aus den erhaltenen Reaktionsdaten wurde der Oxidationsgrad des Zinks unter Bedingungen, die im Oberofen und Übergangsbereich der IS-Anlage herrschen, empirisch ermittelt [ 30 ].

$$R=9,31 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-5610/T} \cdot (P_{\text{Zn}} - P_{\text{Zn}}^e) \quad (14)$$

$R$  – Oxidationsgrad in  $\text{mol/cm}^2\text{s}^{-1}$ ;

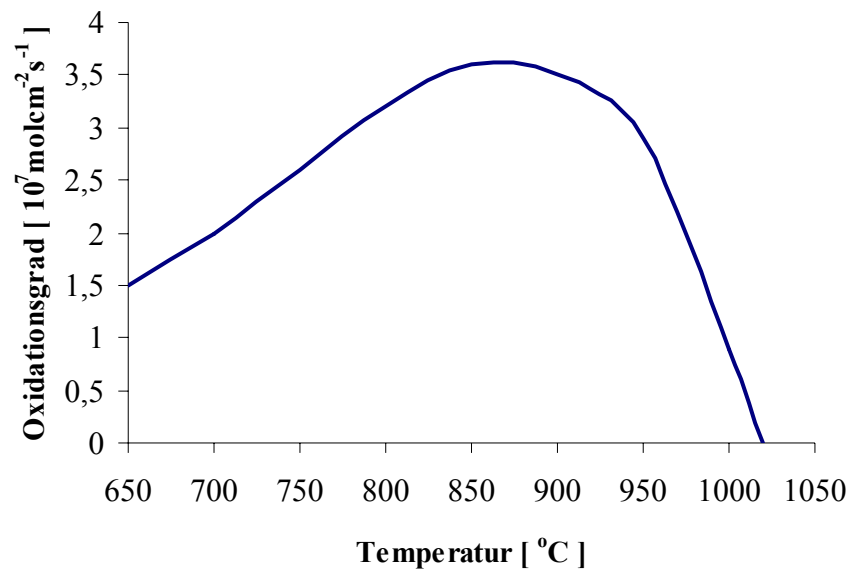
$P_{\text{Zn}}$  – Partialdruck des Zinks in atm;

$P_{\text{Zn}}^e$  – Gleichgewichtspartialdruck des Zinks für das  $\text{Zn}_{(g)}\text{-CO}_2\text{-CO-N}_2$ -System in atm;

$T$  – Temperatur in K.

$P_{\text{Zn}}^e$  entspricht dem Partialdruckwert, bei dem die Rückoxidation des Zinks aufhört. Bild 6 zeigt die Veränderung des Oxidationsgrades in Abhängigkeit von der Temperatur in einem  $\text{Zn}_{(g)}\text{-CO}_2\text{-CO-N}_2$ -System. Der Verlauf der Kurve entspricht der folgenden Gaszusammensetzung (  $\text{Zn} - 7,3 \%$ ,  $\text{CO}_2 - 11,8 \%$ ,  $\text{CO} - 23,4 \%$ ,  $\text{N}_2 - 57,5 \%$  ) [ 33 ].

Es ist ersichtlich, dass mit steigender Temperatur mehr Zink oxidiert wird. Das Maximum wurde bei etwa 850 °C erreicht. Mit der weiteren Zunahme der Temperatur geht die Kurve steil nach unten. Der Oxidationsgrad beträgt bei einer Temperatur von über 1000 °C null. Dies bedeutet, dass Gleichgewichts- und Partialdruck des Zinks gleich sind. Aus diesem Grund findet keine Reoxidation im System statt. Es ist deutlich zu sehen, dass die Entstehung des Zinkoxids durch die Reaktion ( 12 ) bei über 1050 °C nicht möglich ist [ 30, 31, 32 ]. Im Betrieb ist es erforderlich, die Temperatur geringfügig über 1000 °C zu halten, um die Rückoxidation der Zinkdämpfe zu vermindern. Im nachfolgenden Kondensator wird die Temperatur der Ofengase vom heftigen Blei-Regen schlagartig verringert. Wenn es zu einer langsamen



**Bild 6:** Veränderung des Zinkoxidationsgrads im  $\text{Zn}_{(\text{g})}\text{-CO}_2\text{-CO-N}_2$ -System mit der Temperatur [ 30 ]

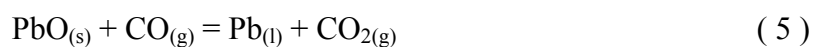
Abkühlung der Gase im Kondensator kommt, besteht die Gefahr, dass ein Teil des Zinkdampfes oxidiert.

Eine teilweise Reoxidation des Zinks ist in der Praxis nicht zu vermeiden. Eine geringe Kondensation der Zinkdämpfe findet wegen der Wärmeverluste während der Beschickung auch schon im Oberofen statt. Außerdem kommen die aus dem Kondensator versprühten Bleitropfchen, welche sich am Mauerwerk niederschlagen, auch in Betracht. Die „kalten“ Bleieinschlüsse ( ca. 500 °C ) kühlen die Wände in Übergangsbereich ab. Dies fördert die Ansatzbildung, weil mehr Zink am Mauerwerk reoxidiert [ 11, 26, 27, 29 ].

#### 2.2.2.2. Einfluss des Bleis auf die Ansatzbildung

Blei beteiligt sich auch direkt an der Ansatzbildung und stellt einen wichtigen Parameter beim Gesamtvorgang der Entstehung eines Ansatzes dar.

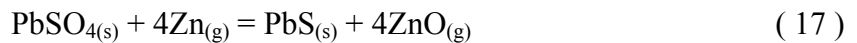
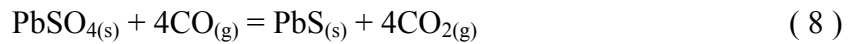
Die Ofengase, die  $\text{Zn}_{(\text{g})}$  und CO erhalten, steigen von der Düsenebene auf. Sie können schon beim Austritt aus dem Ofen das Blei reduzieren. An der Oberfläche der Beschickung laufen folgende Reaktionen ab:



In der Literatur [ 19, 27 ] findet man die Aussagen, dass das flüssige Blei durch die Reaktion mit Schwefel im oberen Bereich des Ofens entstehen kann.

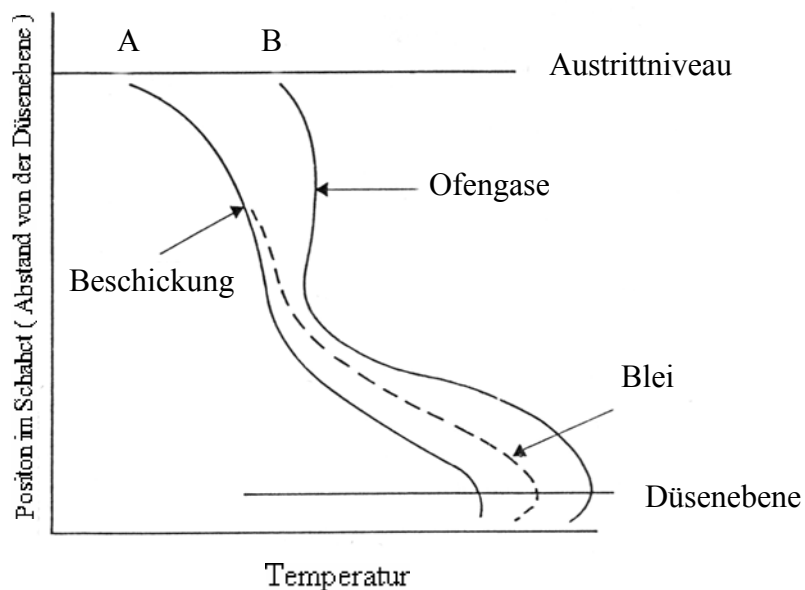


Das Bleisulfid kann im Ofenschacht durch die Reaktion mit Schwefel entstehen, dessen Gehalt im Sinter bei 0,5 % liegt [ 11 ]. Blei ist hauptsächlich als  $\text{PbSO}_4$  gebunden. Das Bleisulfat kann durch Zinkdampf oder Kohlenmonoxid zum Sulfid reduziert werden. Im Ofen findet folgende Umwandlung statt:



Aber das Bleisulfid kann also auch verdampfen, wenn die Beschickung eine bestimmte Temperatur von über 950 °C erreicht, bei welcher der  $\text{PbS}$ -Dampfdruck so groß ist, dass die Reaktion mit gasförmigem Zink nicht ablaufen kann. Der Bleiaustrag tritt also auch mit den Abgasen in Form eines Nebels auf.

Bild 7 zeigt die typischen Temperaturprofile im IS-Ofen. Daraus ergibt sich die Temperaturänderung in Abhängigkeit von der Ofenhöhe. Die Kurve in der Mitte entspricht dem Temperaturverlauf des flüssigen Bleis. Das Metall stellt sein eigenes Profil ein, welches sich zwischen zwei anderen befindet. Mit der Abkühlung der aufsteigenden Gasphase nimmt die Bleikonzentration durch den Niederschlag an der „kälteren“ Beschickung ab. Ein Teil des

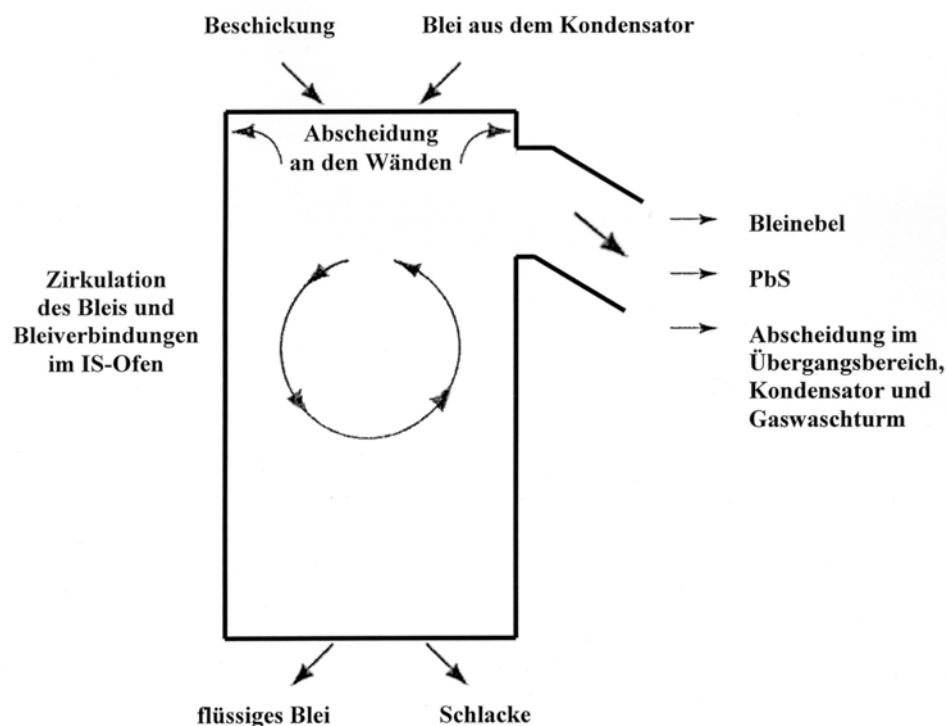


**Bild 7:** Temperaturprofile im IS-Ofen [ 34 ]

flüssigen Bleis kann mit den Abgasen aus dem Ofen in den Kondensator abtransportiert werden.

Das Ansatzwachstum wird durch den Bleiaustrag ebenfalls begünstigt. Die Zink- und Bleiverbindungen erstarren entweder am Mauerwerk oder werden mit den Abgasen in den Kondensator ausgetragen. Dort sammeln sie sich als Trass auf der Oberfläche des

Kondensatorbleis. Ein Teil des flüssigen Bleis und der Bleiverbindungen gelangt mit der Beschickung zurück in den Ofen.



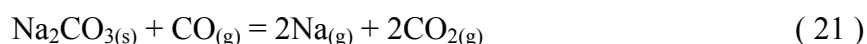
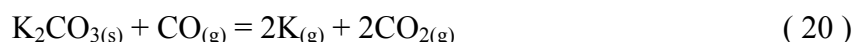
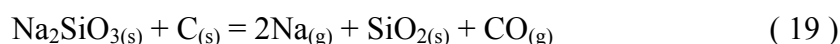
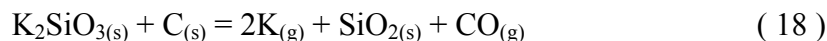
**Bild 8:** Schematische Darstellung des Blei-Kreislaufes [ 29 ]

Dies führt zur Zirkulation von Blei, Bleisulfid und Zink im Ofen ( s. Bild 8 ). Der Zerfall der Bleiverbindungen im Oberofen und ihre Regeneration in verschiedene Formen in den unteren Temperaturbereichen bilden einen Kreislauf in der IS-Anlage.

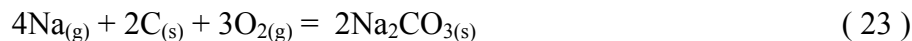
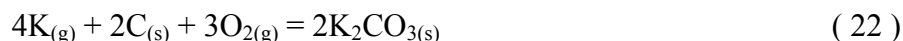
#### **2.2.2.3. Zusammensetzung der Beschickung**

Eine Reihe von unterschiedlichen Untersuchungen im Betriebsmaßstab war erforderlich, um den Anteil der Sekundärvorstoffe auf bis zu 35 % anzuheben [ 13, 14, 35 ]. Aber im Vergleich zu primären Konzentraten sind die Gehalte von Nebenelementen in den Sekundärvorstoffen deutlich höher und ihre Bindungsformen völlig anders. Dies führt zu unterschiedlichem chemischen Verhalten sowie einer anderen Verteilung der Nebenelemente im Materialkreislauf [ 36, 37 ]. So sind z.B. mit dem steigenden Einsatz von alkalihaltigen Briketts aus Sekundärvorstoffen Probleme bei IS-Anlagen aufgetreten, deren Beseitigung z.Z. noch nicht möglich ist. Es wurde weiter festgestellt, dass aus dem Ofenschacht sich verflüchtigendes Alkalioxid/-chlorid ( hauptsächlich  $K_2O/KCl$  ) zur verstärkten Ausbildung extrem harter Ansätze führt [ 38 ]. Die zugeführten Alkaliverbindungen ( im Schachtofen von

Bedeutung sind Alkalisilikate, -karbonate und -oxide ) werden von der Gasphase bei den herrschenden Temperaturen leicht reduziert. Danach verflüchtigen sie sich als Metalle. Natriumsilikat schmilzt bei 1089 °C und der Schmelzpunkt vom Kaliumsilikat liegt bei 997 °C. Die Alkalikarbonate werden bei einer Temperatur von über 900 °C reduziert [19]. Ihr Verhalten im Bereich des Schachtes lässt sich durch folgende Gleichungen darstellen:



Die gebildeten dampfförmigen Alkalien gehen mit dem Gasstrom nach oben. Beim Aufsteigen der Metaldämpfe in die kälteren Ofenzonen tritt eine Reoxidation und Kondensation auf. Daher bilden sich feste, sehr fein verteilte Natrium- und Kaliumverbindungen, die sich an den „kälteren“ Beschickungsbestandteilen, Koks oder Mauerwerk absetzen. Außerdem können sich flüssige Cyanide oder feste Karbonate bilden, die entweder wieder nach unten sinken, oder mit den Ofengasen in den Kondensator mitgeführt werden. Es findet also auch ein Kreislauf der Alkalielemente im Ofen statt.



#### 2.2.2.4. Beitrag der Strömungsverhältnisse zur Ansatzbildung

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Strömungsvorgänge im IS-Ofen im Hinblick auf den spezifischen Koksverbrauch und den Wirkungsgrad eine wichtige Bedeutung haben [ 39, 40 ]. Eine ungleichmäßige Durchgasung des Ofenschachts verschlechtert nicht nur die Schmelzleistung, sondern erhöht auch den Koksverbrauch. Die Ursache dafür ist, dass die Reaktionsgase unausgenutzt den Ofen verlassen und die Reaktionspartner nicht mehr in der gewünschten Weise zusammentreffen [ 20, 41, 42, 43, 44 ]. Im Oberofen gilt das Interesse besonderes den Ofengas/Sekundärluft-Verhältnissen, welche die in diesem Bereich herrschenden Gasgeschwindigkeiten wesentlich beeinflussen [ 11, 45, 46 ].

Die Größe der Ansätze ist durch den Wärmetransport an der Phasengrenze Feststoff/Gasphase ( Wand/Ofengas ) bestimmt. Sie nimmt bei der Verminderung des Wärmeaustauschs aus dem Ofen und bei der Verstärkung der Kühlwirkung der Reaktionsgase zu. Durch gezielte Verbesserung der Gasdurchströmung im Oberofen können auch der Wärmetransport und die

Wärmeübergangsvorgänge positiv beeinflusst werden. Geringere Ansatzbildung ist zu erwarten, wenn der Wärmeübergang von der Gasphase zum Ansatz durch eine intensive Mischung beim Einblasen von vorgewärmter Sekundärluft über die Gichtwinddüsen im Obofen erfolgt [ 47, 48 ]. Die turbulente Gasströmung führt zur Verbesserung des Wärmetransports am Mauerwerk [ 44, 49 ]. Die Zonen schlechter Durchgasung, wo sich die Ansätze entwickeln können, werden durch starke Verwirbelung reduziert. Dies vermindert die Ablagerung von Zinkoxid und den mitgerissenen Staubpartikeln in dieser Ofenzone.

### 2.2.3 Zinkverluste durch Ansatzbildung

Aus den Betriebsergebnissen wurden die Zinkverluste durch Ansatzbildung näherungsweise bestimmt. Man hat die während des Stillstandes herausgebrochenen Ofenansätze gewogen und mit der Zinkproduktion verglichen. Daraus wurden die Zinkverluste prozentual berechnet. Sie stellen das Verhältnis des Zinks, welches zum Oxid am Mauerwerk wird, zu dem durch den Übergangsbereich in den Kondensator abgetragenen Zink dar. In der Tabelle sind die Ergebnisse, die nach 160 Stunden Ofenbetrieb ermittelt wurde, dargestellt:

	Gichtwindfeuchtigkeit [%]	H <sub>2</sub> O-Gehalt [%]	Zinkoxidmasse [ t ]	Zinkverlustrate [%]
1	0	0	21,8	0,72
2	40	2,21	28,5	0,96
3	70	6,71	38	1,3

**Tabelle 1:** Masse des gebildeten Zinkoxides und Zinkverlustrate im IS-Ofen nach 160 h [ 30 ]

Daraus kann man schlussfolgern, dass rund 1 % des gesamten Zinks am Ansatzwachstum teilnimmt und deswegen rund 10 kg Zink pro Tonne verloren gingen. Der Einfluss vom Wasserdampf ist auch von Bedeutung. Durch die Erhöhung der Feuchtigkeit der eingeblasenen Luft werden die Ansätze deutlich größer. Mehr Zink wird vom Wasserdampf reoxidiert, wodurch die Zinkproduktion beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund muss die Feuchtigkeit aus der Sekundärluft vor dem Einblasen entfernt werden, um den Wassergehalt zu minimieren.

### 2.3. Präzisierung der Aufgabenstellung

Im Rahmen der durchzuführenden Modellierung sind die Strömungsvorgänge in einem Schachtofen am Beispiel der Imperial Smelting-Anlage für verschiedene technologische Einblasbedingungen des Gichtwindes zu untersuchen. Dabei soll eine effektivere Einstellung



der Sekundärluftzuführung hinsichtlich einer besseren Abbremsung und Verwirbelung der beiden Gasströme zur Reduzierung der Ansatzbildung am Mauerwerk gefunden werden. Gleichzeitig soll der Staubaustrag aus dem Ofen minimiert werden.

Aus der Literatur und der Betriebsinformation ergibt sich, dass die Position und die Neigung der Düsen sowie das Gichtwindvolumen wichtige technologische Einflussgrößen hinsichtlich der Ansatzbildung darstellen [ 9, 11 ].

Speziell für die Imperial Smelting-Anlage fehlen jedoch bisher detaillierte Untersuchungen. Es ist demzufolge zu erforschen, wie sich Veränderungen dieser Einflussgrößen auf die Strömungsverhältnisse zwischen den aus dem Ofenschacht aufsteigenden Abgasen und dem eingeblasenen Gichtwind auswirken.

Weil solche Untersuchungen am Original mit riesigem Aufwand durchgeführt werden können, ist die Gasdynamik des Prozesses zu modellieren.

Dabei muss insbesondere die konstruktive Gestaltung des Ofens berücksichtigt werden. Die ablaufenden Vorgänge sind durch ein geeignetes Modell weitestgehend nachzubilden. Weil es sich um ein „kaltes“ Modell handelt, finden der Wärmeaustausch sowie energetische Betrachtungen bei der Modellierung keine Berücksichtigung. Zur Messung der Luftgeschwindigkeiten ist ein Messprinzip einzusetzen, dass die Strömung so wenig wie möglich beeinflusst.

Bei den Experimenten werden die Einflussgrößen: Gichtwindvolumen sowie Position und Neigung der Düsen untersucht, um ihre Auswirkung auf die Strömungsverhältnisse der Primär- und Sekundärluft erfassen zu können. Anschließend müssen die Experimente bei der Variation aller Einflussgrößen gemacht, um die effektivste Einstellung der Gichtwindzuführung zu erhalten.

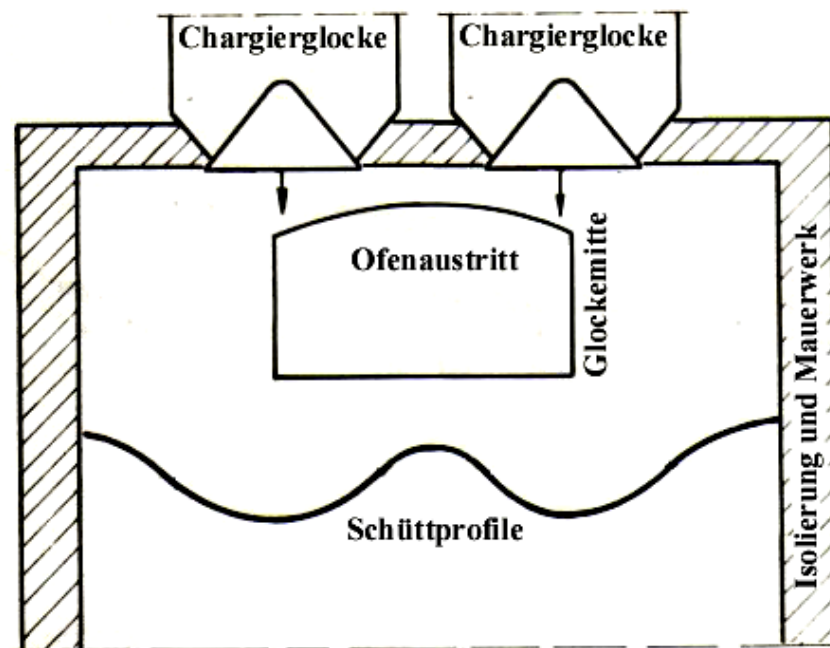
Bei den Untersuchungen des Einflusses des Gichtwindes auf die Ofenströmung wurde die Anzahl und die Form der Düsen nicht variiert. Ihre Position im Oberofen wurde ebenfalls nicht geändert und mögliche Auswirkungen auf das Ansatzwachstum nicht getestet. Diese Parameter stimmen mit dem heutigen Stand der Einblastechnik bei MHD überein.

Aus Betriebsdaten [ 11 ] ist bekannt, dass auch andere Gichtwinddüseneinstellungen am IS-Ofen bei MHD zur Verbesserung der Ofenführung verwendet wurden. Durch die Vergrößerung des Neigungswinkels zwischen den Düsen und dem Möllerniveau ( $> 20^\circ$ ) und den Einbau einer fünften Düse zusätzlich im Mauerwerk gegenüber dem Ofenaustritt wurde beabsichtigt die Ansatzbildung zu verringern. Jedoch bereitete hier die gleichmäßige Verteilung des Gichtwindes Schwierigkeiten. Als Folge war ein ungleichmäßiges Temperaturprofil zu verzeichnen. Im Ergebnis dieser Einstellung wurde festgestellt, dass das

Ansatzwachstum nicht verringert werden konnte. Im Gegenteil - die Ansätze wurden größer und es kam häufig zu Verschlüssen im Oberofen. Aus diesem Grund wurden die Veränderungen rückgängig gemacht.

Bei der vorliegenden Arbeit wurde die Schüttungshöhe als konstant angenommen, d.h. ihr möglicher Einfluss auf die Entstehung und das Wachstum der Ansätze im Oberofen, dessen freie Mauerwerksoberfläche davon abhängig ist, wurde nicht berücksichtigt. Je nach der Art und der Weise der Chargierung erhält man unterschiedliche Schüttprofile, welche einen Einfluss auf die Form und Dicke der Ansatzschicht im Oberofen ausüben [ 13 ]. Aus diesem Grund fand auch die Verteilung der Beschickung auf dem Möllerniveau keine Beachtung.

Bild 9 zeigt die schematische Darstellung des oberen Abschnittes des Ofens. Während der Beschickung sinkt der Kegel der Chargierglocke ab und die Einsatzstoffe in Form eines Kegelmantels fallen herab. Es wurden schon eine Reihe von Versuchen mit verschiedenen Chargiersystemen gefahren, um steuerungsmäßige und verfahrenstechnische Probleme, darunter auch die Ansatzbildung, lösen zu können.



**Bild 9:** Schüttprofil im IS-Ofen, [ 13 ]

Die Konstruktion des Oberofens bzw. des Überganges zum Kondensator, welche auch einen Beitrag zum Ansatzwachstum leistet, wurde aus wirtschaftlichen und zeitlichen Gründen nicht geändert und der mögliche Einfluss wurde deshalb vernachlässigt.

Durch die Strömungsuntersuchungen werden die Flächen und Gebiete sichtbar, wo Möglichkeiten zur Ansatzbildung bestehen. Die Entstehungsmechanismen können mit Hilfe des Modells nur vermutet werden. Aus diesem Grund muss die Auswirkung der

Ansatzbildung auf die Schachtofenströmung nicht nur im Modell, sondern auch in der IS-Originalanlage untersucht werden. Zu diesem Zweck müssen Ansatzproben entnommen und ihre Zusammensetzung analysiert werden. Aber chemische Analysen allein sind für die Beschreibung des Probenmaterials nicht ausreichend. Von besonderem Interesse sind auch die Untersuchungen der Gefügestruktur der Proben mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie. Im Ergebnis aller durchgeführten Untersuchungen sind Aussagen und Schlussfolgerungen für die Bildung der Ansätze zu erarbeiten.

Zum Schluss sollen alle Ergebnisse zusammengefasst werden. Daraus resultierend soll es zu den Empfehlungen zur Gichtwindzuführung und Konstruktion der Imperial Smelting-Anlage kommen, welche Hinweise zur Lösung der Ansatzbildungsprobleme im Ofen geben können. Als Ergebnis sollen die Ausmaße des Ansatzwachstums kleiner werden. Deshalb sollen die Ansätze weniger Zeit für ihre Beseitigung im Anspruch nehmen und der Abstand zwischen den Zwangspausen ( Putzschichten ) der Imperial Smelting-Anlage bei MHD vergrößert werden.

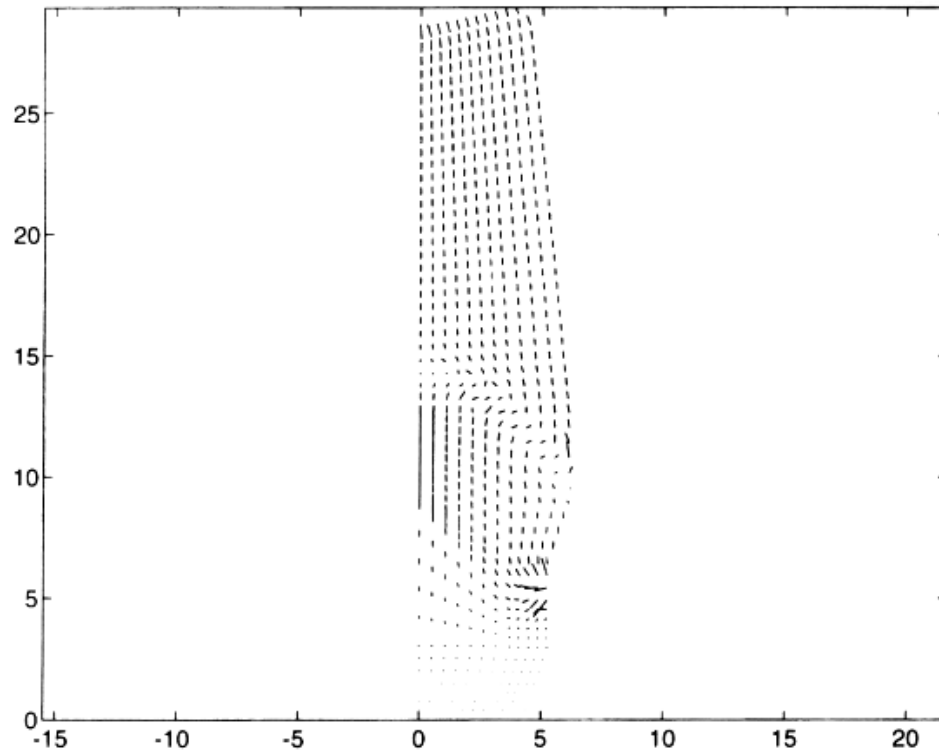
### **3. Physikalische Modellierung des IS-Ofens**

#### **3.1. Modellierung der pyrometallurgischen Prozesse**

Pyrometallurgische Aggregate sind für direkte Untersuchungen der Strömungsverhältnisse in der Gasphase ungeeignet. Im IS-Ofen zum Beispiel lassen sich auf Grund der hohen Temperaturen im oberen Bereich des Schachtes und im Übergang zum Kondensator ( ca. 1000 °C ), der aggressiven Medien sowie den großen geometrischen Abmessungen die Probennahmen bzw. Geschwindigkeitsmessungen nur mit großem Aufwand realisieren [ 3, 50 ]. Als Folge macht sich eine Modellierung der Vorgänge im IS-Ofen ( gasdynamisch und chemisch ) notwendig. Die entsprechenden Untersuchungen sind also auch mit geringeren Kosten und kürzeren Entwicklungszeiten verbunden. Infolgedessen erwies sich die Modellierung für Probleme der Pyrometallurgie als eine geeignete Untersuchungsmethode [ 51, 52, 53, 54, 55 ].

So hat eine z.B. mit Wasser oder organischen Substanzen arbeitende Modellanlage den Vorteil, dass die Strömungsvorgänge einfach erfasst und sichtbar gemacht werden können [ 4, 5 ]. Dabei ist im Unterschied zu den Betriebsuntersuchungen eine breite Variation der Hauptparameter wie Geschwindigkeit, Druck, Temperatur geometrische Form und Größe möglich. Auf diese Weise können die wichtigsten Zusammenhänge untersucht und geklärt werden. Durch die Anwendung der Modellierung können die Grundlagen für die Experimente am Original bereitgestellt werden, welche zur Optimierung der heute zur Verfügung stehenden Verfahren beitragen können. Infolge der komplizierten chemischen und physikalischen Vorgänge bei den pyrometallurgischen Prozessen ist es sehr kompliziert, ein identisches Modell aufzubauen. Deswegen muss man von einer partiellen Ähnlichkeit ausgehen. Trotz der Beschränkung der Aussagefähigkeiten können die physikalischen Sachverhalte durch die erhaltenen Ergebnisse genau beschrieben werden. Sehr oft ist es gar nicht erforderlich den ganzen Prozess ähnlich zu gestalten, sondern kann man einzelne Abschnitte untersuchen. In solchen Fällen können Material, Energie und Messtechnik für die Untersuchungen eingespart werden. Die entsprechenden Untersuchungen nehmen damit weniger Zeit in Anspruch [ 4, 5, 50 ].

Um die ablaufenden Vorgänge zu simulieren, können neben physikalischen auch mathematische Modelle eingesetzt werden [ 57, 58, 59, 60, 61, 62 ]. Bild 10 zeigt das Ergebnis der numerischen Simulation der Gasströmung im Hochofen. Darauf sind die zugehörigen Stromlinien dargestellt. Das Modell zur Beschreibung der Strömung der Gase lässt sich als Näherung der Navier Stokes Gleichung interpretieren.



**Bild 10:** Strömungsvektoren der Gasströmung im Hochofen [ 6 ]

Das Ziel des Hochofenmodells war die Simulation des komplexen Zusammenspiels der Einzelvorgänge. Man versuchte, die ablaufenden chemischen als auch physikalischen Prozesse im Detail zu beschreiben. Eine wirklich detailgetreue Modellierung aller Vorgänge im Hochofen ist dabei zu kompliziert und nicht unbedingt notwendig. Welche Verfeinerungen tatsächlich durchgeführt werden sollen, hängt davon ab, für welche spezielle Fragestellung eine genauere Untersuchung benötigt wird. Das präsentierte Modell bietet die nötige Ausgangsbasis für die Simulation von Detailvorgängen. Trotz all der Näherungen ( die Strömung am Hochofenmauerwerk verläuft parallel zur Wand, die auftretenden Strömungsstrukturen sind stationär, vorgegebene Massenstrom am toten Mann, Vernachlässigung der Diffusion u. a. ) sind die hilfreichen Aussagen über die Auswirkung unterschiedlicher Einsatzmaterialien und der Variation der Ofensteuerung zu erwarten.

Vorteile solcher Modelle sind die detaillierte Berücksichtigung der die Prozesse bestimmenden Vorgänge. Nachteile dieser Modellierungsweise liegen darin, dass in der Regel die Entwicklungszeiten meist im Bereich mehrerer Jahre liegen und in der Tatsache, dass bedingt durch die Zielsetzung der Modelle nur selten Verknüpfungsmöglichkeiten zu einem anderen Modell der Prozesskette gegeben sind [ 62 ].

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die physikalische Untersuchung zugegriffen, weil die allgemeinen Angaben zu den Strömungsverhältnissen im IS-Ofen fehlen. Entsprechend der

Aufgabenstellung ist es nicht notwendig das gesamte Verfahren zu modellieren. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Experimente auf die Ofenbereiche, wo sich die Ansätze bevorzugt bilden können.

### **3.2. Grundlagen der Simulation**

Wenn Untersuchungen an einem Modell durchgeführt werden, müssen die in diesem Modell ablaufenden Vorgänge den Prozessen im Original ähnlich sein. Für die Erreichung dieser Bedingungen muss man bei der Entwicklung dieses Modells alle Regeln, die durch die Theorie der Ähnlichkeit bestimmt werden, befolgen.

Um die Ähnlichkeit von zwei physikalischen Erscheinungen zu erreichen, muss man folgende Regeln berücksichtigen [ 63, 64 ]:

- Die dimensionslosen Kennzahlen, die diese Erscheinungen beschreiben, müssen ähnlich sein.
- Die Bedingungen der Eindeutigkeit müssen ebenfalls ähnlich sein. Das sind solche, die aus der Menge der Erscheinungen, deren Natur analog ist und die auch durch analoge Gleichungen beschrieben werden, irgendeine aussuchen. Eine solche Bedingung ist zum Beispiel die geometrische Ähnlichkeit zweier betrachteter Erscheinungen.

Um die Strömungsverhältnisse im IS-Ofen an einem Modell bestimmen zu können, müssen die problemrelevanten physikalischen Größen von Ofen und Modell in einem festen Verhältnis zueinander stehen. Dabei ist zuerst auf die geometrische Ähnlichkeit zu achten, um vergleichbare Aussagen zu den Strömungsvorgängen machen zu können. Die grundlegenden Abmessungen sind um einen festen Wert verändert. Die geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und Original ( Großausführung ) ist eine notwendige, jedoch keine hinreichende Bedingung für ähnliche Strömungsverhältnisse. Es müssen zusätzlich die beim Strömungsvorgang wirkenden Kräfte im gleichen Verhältnis zueinander stehen. Das wird erreicht, wenn die dimensionslosen Kennzahlen für Modell und Original gleiche Werte annehmen. Durch die Ähnlichkeit der Form und der Kräfte ermöglichen die ermittelten Kenngrößen, die im Modell gemessenen Strömungsverhältnisse auf den Originalprozess zu übertragen. Kriterien einer physikalischen Modellierung eines Ofens sind also zunächst [ 65 ]:

- eine geometrische Ähnlichkeit von Modell und Original

- das Einstellen eines Strömungszustands in der Weise, dass dimensionslose Kennzahlen, die zur Charakterisierung der Vorgänge als relevant angesehen werden, einander entsprechen.

Für die Modellierung wird vereinfachend ein isothermer Prozess angenommen, der unabhängig vom chemisch-thermischen Gleichgewicht abläuft. Die folgende Tabelle zeigt geometrische und physikalische problemrelevante Parameter, welche unter diesen Umständen Bedeutung für den Stoffübergang haben.

Bei einer derartigen Vielfalt von Einflussparametern ist es verständlich, dass nicht alle Parameter im gleichen Verhältnis zwischen Original und Modell verändert werden können. Entsprechend den Regeln der Ähnlichkeitslehre ist es jedoch möglich, einzelne Einflussgrößen zu dimensionslosen Kennzahlen zusammenzufassen. Sind die Kennzahlen zwischen Original und Modell gleich, ist die Ähnlichkeit gewährleistet.

Volumen des Schachtes	$U$	$\text{m}^3$
Fläche des Schachtes	$A$	$\text{m}^2$
Schachtquerschnitt	$d$	$\text{m}$
Geschwindigkeit der aus dem Schacht aufsteigenden Gase	$u$	$\text{m/s}$
Position der Gichtwindddüsen	$\beta$	$^\circ$
Neigung der Gichtwindddüsen	$\gamma$	$^\circ$
Gichtwindvolumen	$v$	$\text{m}^3/\text{h}$
Kinematische Viskosität des Gases	$\nu$	$\text{m}^2/\text{s}$
Geschwindigkeit des Gichtwindes	$u_G$	$\text{m/s}$

**Tabelle 2:** Problemrelevante Parameter bei Annahme eines isothermen Prozesses

### 3.3. Ähnlichkeitskennzahlen

Wenn die Gase durch den IS-Ofen strömen, dominieren Trägheits- und Druckkräfte. Sie werden durch Variation der Geschwindigkeit und der Druckverteilung im Schacht in Abhängigkeit von eingegebenen geometrischen Größen, wie z.B. Querschnittsänderung sowie physikalischen Parameter, wie Dichte und dynamische Zähigkeit des strömenden Mediums hervorgerufen. Dazu zählen auch Reibungskräfte, welche durch die Reibung der Ofengase am Mauerwerk entstehen. Setzt man diese Kräfte zusammen ins Verhältnis, erhält man zwei dimensionslose Kennzahlen [ 63 ]:

$$\text{Euler-Zahl: } Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot u^2} \quad (26)$$

$$\text{Reynolds-Zahl: } Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (27)$$

$u$  - die Geschwindigkeit des Mediums in m/s;

$L$  - eine charakteristische Länge in m;

$\nu$  - die kinematische Viskosität des bewegten Mediums in m<sup>2</sup>/s;

$\rho$  - die Dichte des bewegten Mediums in kg/m<sup>3</sup>;

$\Delta P$  - der Druckverlust in Pa.

Der Druckverlust  $\Delta P$  ist bei den vorgegebenen geometrischen Randbedingungen durch die Strömungsgeschwindigkeit  $u$  festgelegt [ 63 ]. Bei den geometrisch ähnlichen Nachbildungen ist die Euler-Zahl lediglich eine Funktion der Reynolds-Zahl. Gemäß den Betriebsdaten liegt der  $\Delta P$ -Wert bei nur ca. 0,02 bar, ihr wird eine geringe Bedeutung beigemessen. Deswegen ist die Re-Zahl für die dynamische Ähnlichkeit der Strömung entscheidend. Eine Übereinstimmung in den Re-Werten von Modell und Original als wichtigste Kennzahl ist zu erreichen. Sie ist demzufolge eine bedeutsame Einflussgröße. Sollen zwei Strömungen ähnlich verlaufen, so muss die Reynolds-Zahl für beide Vorgänge den gleichen Zahlenwert haben, nur so wird die Übertragung von Versuchsergebnissen auf die Originalanlage möglich.

$$\frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{u' \cdot L'}{\nu'} \quad (28)$$

Die erforderlichen Stoff- und Prozessdaten wurden von MHD zur Verfügung gestellt [ 33 ]. Daraus wurden die Re-Zahl entsprechen der Gleichung ( 25 ) berechnet. Die charakteristische Länge, die für einfachere Fälle entsprechend der Literatur eingesetzt werden kann, ist für den hier vorliegenden ovalförmigen Schachtquerschnitt ( $d$ ) wie folgt zu berechnen [ 66 ]

$$d = \frac{4 \cdot U}{A} = \frac{4 \cdot ((3,46^2 \cdot \pi / 4 + 3,46 \cdot 3,844) \cdot 7,7)}{\pi \cdot 3,46 \cdot 7,7 + 2 \cdot 3,844 \cdot 7,7} \quad (29)$$

$d$  - der Schachtquerschnitt in m;

$U$  - das Volumen des Schachtes in m<sup>3</sup>;

$A$  - die Fläche des Schachtes in m<sup>2</sup>.



Die kinematische Viskosität der Gasphase bei 1000 °C errechnet sich näherungsweise zu einem Wert von  $195 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ . Unter Verwendung der Hauptgasstrommenge von 61000 m<sup>3</sup>/h und des Gichtwindvolumens von ca. 4000 m<sup>3</sup>/h ergibt sich eine durchschnittliche Geschwindigkeit des Gases von 3,5 m/s. Es ist damit mit einer Reynolds-Zahl von  $Re \sim 84000$  zu rechnen. Es ist zu beachten, dass die Berechnung bezogen auf den Leerquerschnitt des Ofens durchgeführt wurde, d.h. die Beschickung und die Ansätze am Mauerwerk wurden dabei nicht berücksichtigt.

### **3.4. Annahmen**

Die im IS-Ofen ablaufenden Strömungsvorgänge sind von äußerst komplexer Natur. Um das Problem einer Modelluntersuchung zugänglich machen zu können, werden folgende Annahmen getroffen:

- Die Gasgeschwindigkeit wird bezogen auf den Leerquerschnitt des Ofens gemessen. Der Einfluss der Beschickung auf die Ofenströmung wird nicht berücksichtigt. Die auftretenden Strömungsstrukturen ( insbesondere im Oberofen ) sind stationär.
- Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Strömungssimulation in einem „kalten Modell“, d.h. die Anlage wird mit Umgebungsluft betrieben. Die chemisch-metallurgischen Wechselwirkungen der Reaktionspartner im Ofen werden somit nicht wiedergegeben. Die unterschiedliche Viskosität der aufsteigenden Ofengase und des eingeblasenen Gichtwindes wird ebenfalls nicht berücksichtigt.
- Es werden im Rahmen dieser Untersuchungen keine Ansatzbildung an den Wänden, die im Laufe der Zeit zur Verringerung des Ofenquerschnittes führt, berücksichtigt.
- Der Einfluss von Oberflächen- und Gravitationskräften auf die Luftströmung ist auf Grund der vorherrschenden Zwangsströmung vernachlässigbar.

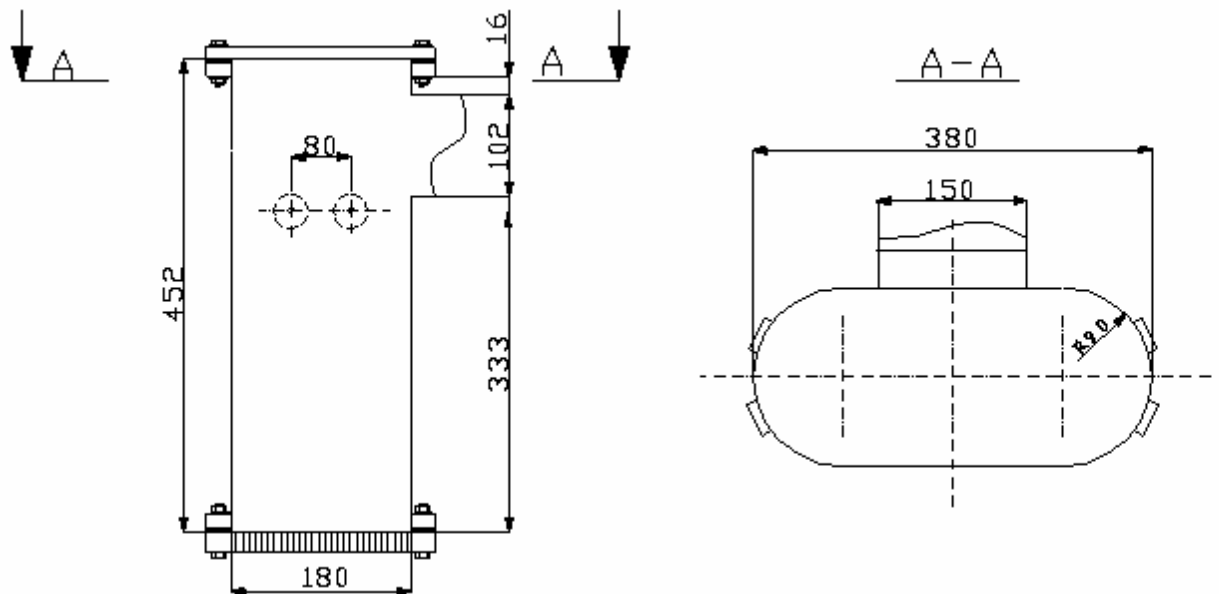
### **3.5. Auswahl der Größe und Dimensionierung der Modellanlage**

Basierend auf den Dimensionen und den technischen Daten des IS-Ofens bei MHD erfolgte die Konstruktion eines geometrisch ähnlichen Modells im Maßstab 1:17. Danach betragen die Höhe des Modells 452 mm und die Breite 180 mm ( s. Bild 11 ).

Der Maßstab des Modells 1:17 ergab sich aus drei Gründen:

- Die Luftmengen, die zur Einstellung einer ähnlichen Reynolds-Zahl wie im Originalofen erforderlich sind, müssen im Labormaßstab beherrschbar sein.

- Der gesamte Modellraum soll für die Messsonde des verwendeten Lasergerätes erreichbar sein, weil die maximale Eindringtiefe nur 380 mm beträgt.
- Für die Konstruktion der zylindrischen Abschnitte des Ofenmodells wurde ein Plexiglasrohr verwendet, das entlang der Axialachse aufgeschnitten wurde. Die weitere Dimensionierung richtete sich nach den Abmessungen, in denen dieses Rohr in entsprechender optischer Qualität handelsüblich war.



**Bild 11:** Skizze des IS-Ofenmodells, links – Seitensicht, rechts – Sicht von oben

Für die Einstellung einer gleichen Reynolds-Zahl im freien Schacht ist mit Hilfe eines Gebläses im physikalischen Modell eine Luftgeschwindigkeit um ca. 3,5 m/s zu erreichen. Mit dieser Geschwindigkeit wird die Umgebungsluft ins Modell gesaugt. Wie in der Betriebsanlage ist die Reynolds-Zahl im Modellschacht ebenfalls kleiner als  $10^5$ , sie beträgt hier ca. 72000. Die beiden Werte liegen in der gleichen Größenordnung. Damit besteht die Möglichkeit die an einem Modell erhaltenen Ergebnisse auf das Original zu übertragen den physikalischen Sachverhalt zu beschreiben.

Entsprechend der dargelegten Schlussfolgerungen wurde ein Modell realisiert, welches geometrisch und physikalisch der Originalofenströmung ähnlich und so gestaltet ist, dass die zu untersuchenden Probleme mit Hilfe geeigneter Messmethoden bearbeitet werden können.

## **4. Möglichkeiten zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten**

Aus der Literatur [ 40, 43, 44, 67 ] ist bekannt, dass der Stoffaustausch in pyrometallurgischen Aggregaten ( wie auch der bei der Modellierung vernachlässigte Wärmeaustausch ) in erheblichem Maße durch die Fluidodynamik beeinflusst wird. Auch die Ansatzbildung an den Ofenwänden wird durch die herrschenden Strömungsverhältnisse wesentlich mitbestimmt. Es gibt nur wenige Angaben zu den in der IS-Anlage ablaufenden Prozessen [ 11 ]. Aus diesem Grund scheint eine detaillierte Untersuchung der Strömungsvorgänge im Ofenschacht bei verschiedenen Einstellungen der Gichtwindzuführungen hinsichtlich der Ansatzbildung notwendig.

### **4.1. Flügelrad-Anemometrie**

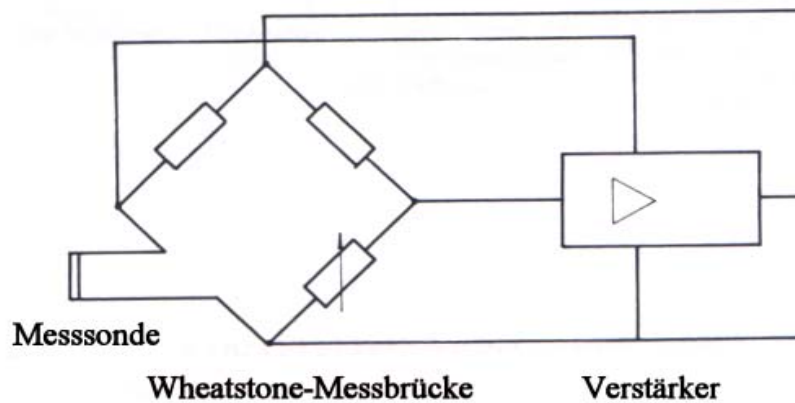
Das Messgerät besteht aus einer Flügelradsonde, dessen Drehzahl bestimmt und in proportionale elektrische Signale umgewandelt wird. Vor der Messung muss das Anemometer kalibriert werden, so dass jeder Drehzahl eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit zugeordnet werden kann. Die Strömungsrichtung des Fluides entspricht jener Stellung der Flügelradachse, bei der die maximale Drehzahl auftritt [ 5 ].

Vorteil dieses Verfahrens ist ein einfacher Aufbau des Messgerätes. Als Hauptnachteil muss die erhebliche Störung der Strömung durch das Flügelrad erwähnt werden, was seinen Einsatz nur bei großen Querschnitten erlaubt. Außerdem wird lediglich eine durchschnittliche Geschwindigkeit aufgenommen. Die Auflösung von Turbulenzen ist nicht möglich.

### **4.2. Konstant-Temperatur-Anemometer ( KTA )**

Anemometermessungen basieren auf der Grundlage des Wärmeverlustes durch Konvektion eines elektrisch geheizten Fühlers, hervorgerufen durch Umströmung des Fühlers vom Medium. Das Messgerät ( s. Bild 12 ) besteht im Prinzip aus einer Wheatstone-Messbrücke und einem Verstärker. Einer der Brückenwiderstände befindet sich in der Strömung.

Durch die Konvektion kommt es zur verstärkten Wärmeabgabe am Hitzdraht, was eine Änderung des Widerstandswertes bewirkt. Durch die Auswertelektronik wird auf Basis einer Kalibrierungskurve für das untersuchte Fluid der Widerstandswert wieder in eine Konvektionsgeschwindigkeit zurückgerechnet. Wobei darauf zu achten ist, dass andere Parameter im strömenden Medium ( hauptsächlich die Temperatur ) unverändert bleiben.



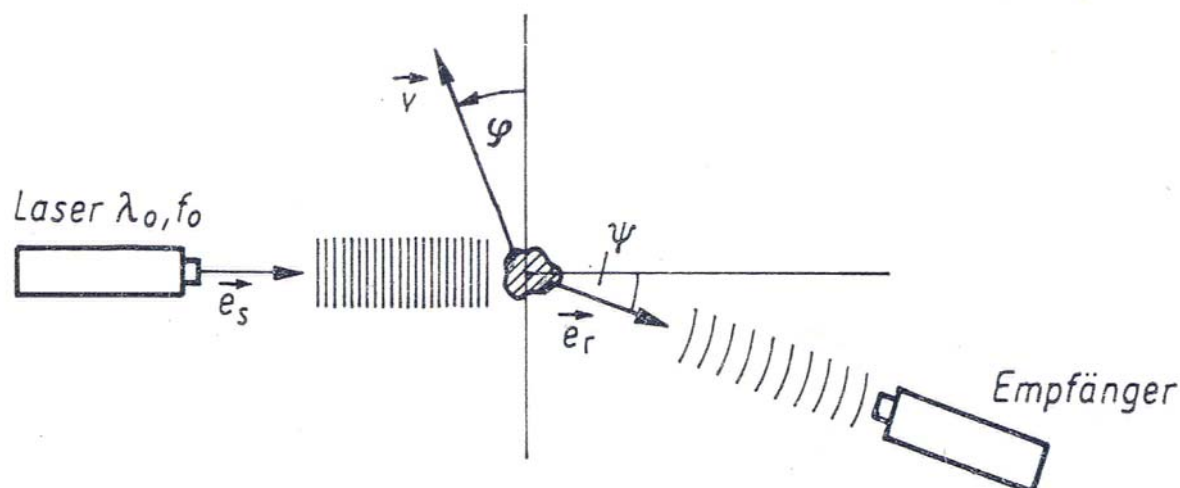
**Bild 12:** Grundprinzip der KTA-Technik [ 4 ]

Als Nachteil dieses Messsystems erweist sich neben der Beeinflussung der Strömung durch die Messsonde vor allem die Anfälligkeit des Hitzdrahtes gegenüber Verschmutzung sowie die Bildung von Gasbläschen am Hitzdraht, die zu undefinierten Veränderungen des Wärmeüberganges führen. Außerdem ist eine Bestimmung der Strömungsrichtung nicht möglich. Aus diesem Grund müssen getrennte Untersuchungen, z.B. mit einer Fadensonde, durchgeführt werden. Der Vorteil dieses Gerätes liegt in der relativ genauen Messung der Geschwindigkeit, wobei jedoch insbesondere bei turbulenten Strömungen nur ein Mittelwert der Geschwindigkeit angegeben werden kann [ 5 ].

### 4.3. Laser-Doppler-Anemometrie ( LDA )

Wie schon erwähnt, besitzen die mechanischen Strömungsmessverfahren auf der Basis von Flügelrädern oder Hitzedraht/Heißfilmsonden alle den Nachteil, dass sie nicht berührungsfrei arbeiten. Das Einbringen von Sonden beeinflusst die Messungen der lokalen Momentangeschwindigkeit durch Störung der Strömung. Die Laser-Doppler-Anemometrie ist dagegen ein laseroptisches Messverfahren zur berührungslosen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten an einem nahezu punktförmigen Messort in lichtdurchlässigen Medien. Mit dieser vielseitigen Methode können Untersuchungen von komplexen Strömungsfeldern durchgeführt werden, in denen die Anwendung konventioneller Sondentechniken nicht möglich ist. Weil die erzeugten Signale, welche die Geschwindigkeitsinformation beinhalten, nur von der Optik des Systems abhängen, ist keine spezielle Kalibrierung notwendig. Dies erlaubt die Geschwindigkeitsmessungen mit hoher räumlichen Auflösung ( Fokusdurchmesser bis zu  $20\text{ }\mu\text{m}$  ) und in einem breiten Geschwindigkeitsbereich (  $10^{-4}\text{ m/s}$  bis  $10^3\text{ m/s}$  ). Bei den Untersuchungen von Strömungen in gasförmigen und flüssigen Medien wurden in den letzten Jahren Laser-Doppler-Anemometer in zunehmendem Maße eingesetzt [ 5, 68, 69 ].

Die Laser-Doppler-Anemometrie ist ein indirektes Messverfahren. Die Grundlage dieser Methode ist der Doppler-Effekt. Er beruht auf der Tatsache, dass kohärentes Licht ( Laserlicht ) bei der Streuung durch ein bewegtes Teilchen um eine bestimmte Frequenz verschoben wird, die direkt proportional der Geschwindigkeit des bewegten Teilchens ist [ 70 ]. Das Grundprinzip der Laser-Doppler-Anemometrie ist in Bild 13 dargestellt.



**Bild 13:** Grundprinzip der Laser-Doppler-Anemometrie [ 70 ]

Der Laser der Wellenlänge  $\lambda_0$  sendet ein Strahlbündel monochromatischen Lichtes ( Beleuchtungsstrahl ) mit der Frequenz  $f_0$ , das sich in Richtung  $\vec{e}_s$  ausbreitet, in das Medium mit der Strömungsgeschwindigkeit  $v$ . Die Strahlung wird an den mitgeführten Partikeln gestreut. Für den Empfänger treten sie als bewegte Sender für Streulicht mit der Frequenz  $f_p$  auf. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Richtung für den ausgesendeten Beleuchtungsstrahl  $\vec{e}_s$  und die durch den Detektor fixierte Richtung der aufgenommenen Streuwelle  $\vec{e}_r$  ergibt sich dabei die vom Empfänger gemessene Frequenz:

$$f_E = f_0 * \frac{1 - e_s * v / c}{1 - e_r * v / c} \quad (30)$$

$f_E$  - die vom Empfänger aufgenommene Frequenz in MHz,

$f_0$  - die Frequenz des ausgesendeten Strahles in MHz,

$c$  - die Schallgeschwindigkeit in m/s.

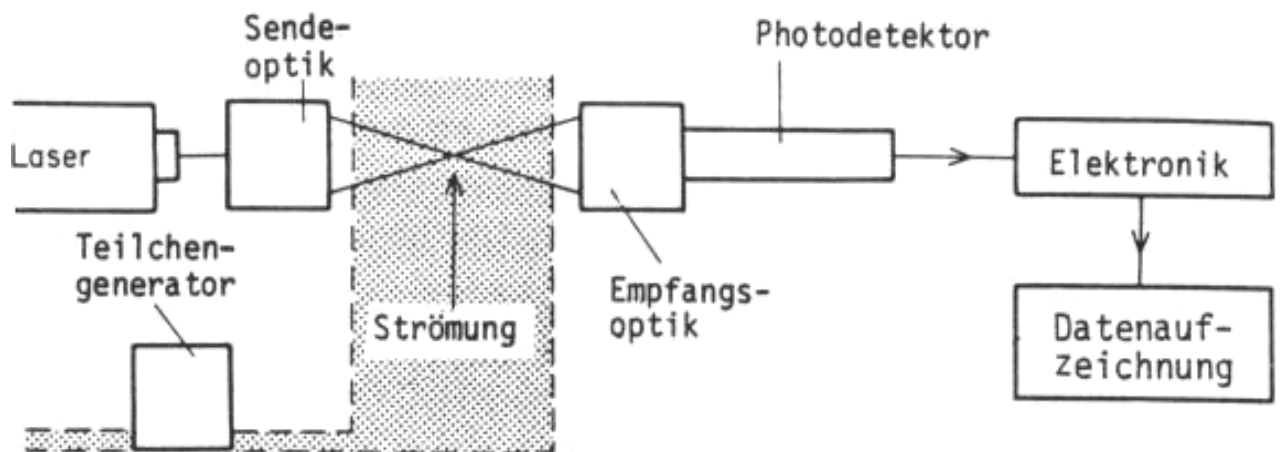
Die obige Gleichung kann durch

$$f_E = f_0 + f_0 * \frac{v}{c} * (e_r - e_s) \quad (31)$$

angenähert werden. Die durch den Doppler-Effekt hervorgerufene Frequenzverschiebung beträgt damit:

$$\Delta f_d = f_0 * \frac{v}{c} * (e_r - e_s) \quad (32)$$

Ein Laser-Doppler-Anemometer besteht im allgemeinen aus drei Baugruppen. Das sind die Lichtquelle sowie die Sende- und die Empfangstechnik. Bild 14 Zeigt die Komponente eines LDA-Systems.



**Bild 14:** Komponenten eines LDA-Systems [ 71 ]

Üblicherweise werden für die Laser-Doppler-Anemometrie Dauerstrichlaser der unteren Leistungsklasse, d.h. im Bereich von einigen Milliwatt bis wenigen Watt Lichtleistung, verwendet. Dabei wird meist der Lichtstrahl eines Lasers durch eine geeignete Strahlteilungsoptik in zwei Partialstrahlen aufgespaltet ( s. Bild 14 ). Die beiden Partialstrahlen werden mit einer Konvexlinse fokussiert und am Brennpunkt zum Schnitt gebracht. Den Schnittpunkt, an dem die Messung durchgeführt wird, bezeichnet man als Messvolumen. Das Signal entsteht aus der Überlagerung der Streuwellen, die von den beiden Laserstrahlen am Streupartikel erzeugt werden. Im Falle der Fluide können suspendierte

Teilchen, Tröpfchen und natürliche Verunreinigungen benutzt werden. Dort, wo keine Streupartikel vorhanden sind, können mitgeführte Bläschen für die Messung zum Einsatz kommen. Sind die Teilchen hinreichend klein, so kann davon ausgegangen werden, dass keine Rückwirkung auf die Strömung eintritt und die erhaltene Frequenzverschiebung damit einer bestimmten Geschwindigkeit der Strömung entspricht.

Durch die örtliche Überlagerung der beiden Laserstrahlen im Messvolumen entsteht ein räumliches Interferenzbild, das sich in der periodischen Schwankungen der elektrischen Feldstärke äußert. Der Abstand der Interferenzflächen  $\Delta x$  hängt von Schnittwinkel  $\Theta$  der Laserstrahlen und der Wellenlänge ab

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 * \sin \Theta / 2} \quad (33)$$

$\Delta x$  - der Abstand der Interferenzflächen in mm,

$\lambda$  - die Wellenlänge des Laserlichtes in mm,

$\Theta$  - der Winkel zwischen den Laserstrahlen in °.

Die Schwebefrequenz der resultierenden Streuwelle  $f_E$  hängt direkt von der senkrecht zu den Interferenzflächen auftretenden Geschwindigkeitskomponente  $v_{\perp}$  und dem Abstand der Interferenzflächen ab

$$f_E = v_{\perp} / \Delta x \quad (34)$$

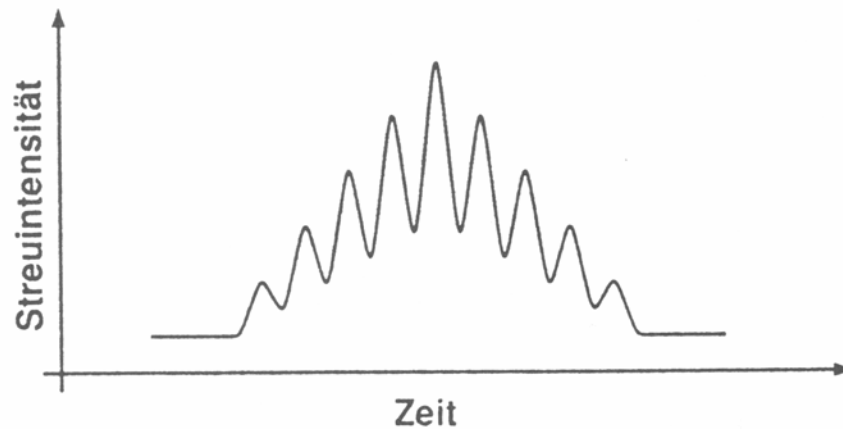
$f_E$  - die Schwebefrequenz der Streuwelle in MHz,

$v_{\perp}$  - Geschwindigkeitskomponente in m/s.

Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass die Frequenz des empfangenen Signals unabhängig von der Stellung des Detektors ist [ 72 ].

Die Fotodetektion des Streusignals kann auf verschiedene Arten erfolgen. Überwiegend kommen Fotodioden und Fotomultiplikatoren zum Einsatz, die entsprechend der Lichtleistungserfordernisse und des notwendigen Frequenzbereichs ausgewählt werden müssen. Das mit einem Empfänger aufgenommene optische Signal wird mit Hilfe umfangreicher elektronischer Auswerteeinheiten geprüft, gespeichert und in die Geschwindigkeit umgerechnet. Weil Tausende dieser Einzelschwingungen für ein Messergebnis in einem einzigen Strömungsfeld-Punkt häufig auszuwerten sind, kommen für

die Strömungsuntersuchungen nur automatisch arbeitende Signalprozessoren in Frage, die in Zusammenarbeit mit Rechnern die anfallenden Daten analysieren und aufbereiten.



**Bild 15:** Typisches LDA-Signal [ 73 ]

Bild 15 zeigt ein typisches LDA-Signal, wie es von einem Oszilloskop festgestellt werden kann. Man bezeichnet dieses Signal als Burst. Ein Teilchen durchläuft diese periodische Interferenzverteilung. Die Intensität des dabei gestreuten Lichts wird ebenfalls periodisch schwanken. Die Frequenz, aus der sich das Signal aufbaut, stellt die Signalfrequenz, d.h. die Schwebungsfrequenz dar. Die Modulationstiefe hängt von der Größe der streuenden Teilchen, ihre Konzentration im Messvolumen sowie von der Hintergrund-Streuung am strömenden Medium ab.

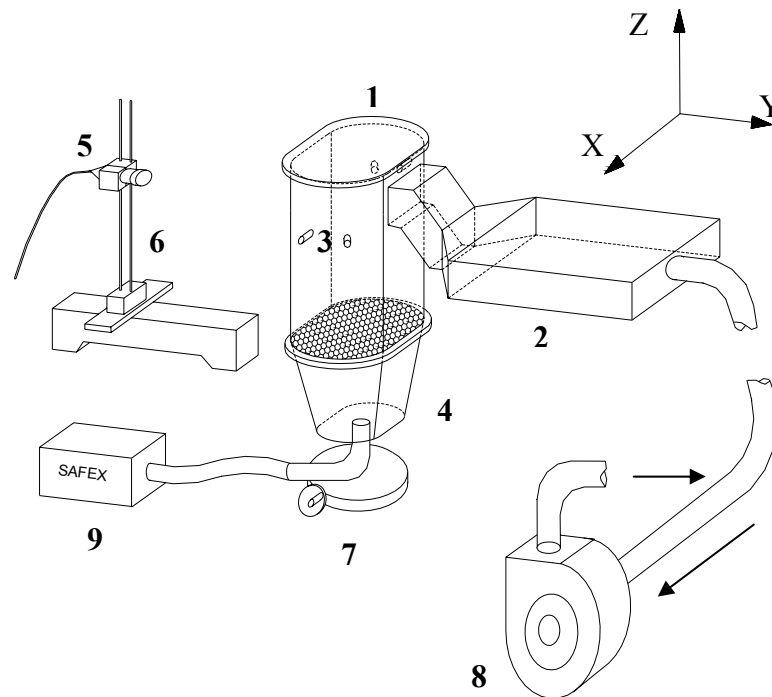
Auf Grund der Vorteile, insbesondere die fehlende Beeinflussung der Strömung des Fluides sowie die erreichbare hohe zeitliche und örtliche Auflösung eignet sich die Laser-Doppler-Anemometrie besonders gut für die durchzuführenden Messungen.



## 5. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

### 5.1. Modellaufbau

Auf der Basis der von M.I.M. Hüttenwerke Duisburg zur Verfügung gestellten Zeichnungen des IS-Schachtofens wurde ein geometrisch verkleinertes Modell im Maßstab 1:17 gebaut.



**Bild 16:** Schematische Darstellung der Versuchsanlage: 1 Ofenmodell, 2 Kondensatormodell, 3 Gichtwinddüsen, 4 Windkasten, 5 Messsonde/Laser, 6 Höheneinstellung, 7 Dreheinrichtung, 8 Gaslüfter, 9 Safex-Nebelgerät

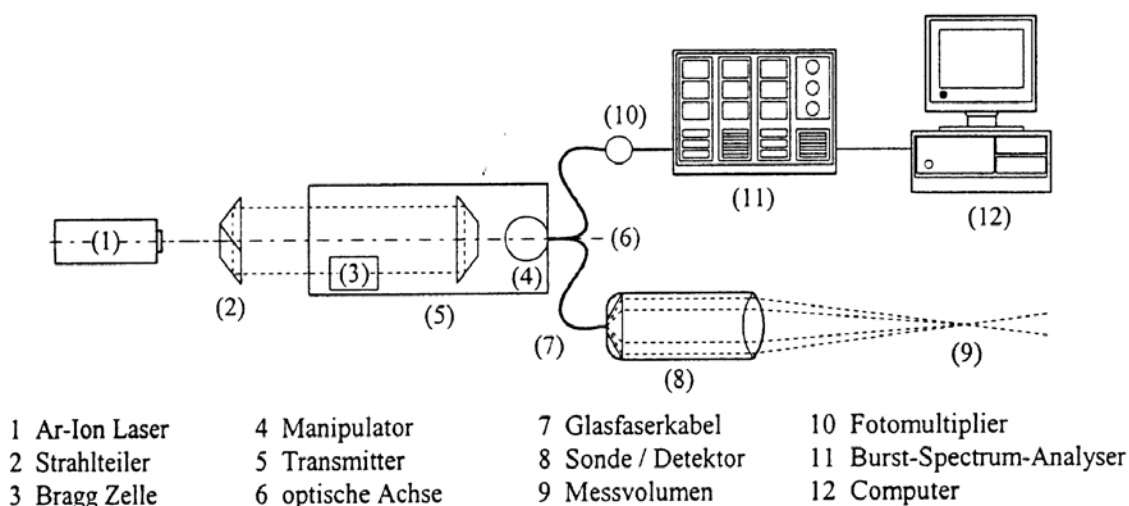
Das Modell besteht aus den geometrisch ähnlichen Nachbildungen der Originalanlage. Für die Strömungsuntersuchungen wurden Ofenschacht, Oberofen, Übergang und Kondensator aus Plexiglas gefertigt. Die anderen Teile bestehen aus PVC, weil die optische Transparenz hier nicht nötig ist. Damit man einzelne Abschnitte austauschen kann, besteht das Ofenmodell aus einzelnen Segmenten, die miteinander verschraubt sind.

Im Gegensatz zum Original des Ofens, bei dem man den Heißwind durch Winddüsen im unteren Ofenteil einbläst, wird die Luft ins Modell von einem Gaslüfter ( s. Pos. 8, Bild 16 ) von unten durch das Modell gesaugt. Das Ofenmodell und der Gaslüfter sind dabei durch ein Rohr verbunden. Die Luft enthält Nebelpartikel, die von einem speziellen Nebelgerät erzeugt werden. Um die gleichmäßige Strömungsverteilung beim Eintritt in den Schacht zu erreichen, wurde eine wabenförmige Schicht zwischen dem Windkasten ( s. Pos. 4, Bild 16 ) und dem Ofenschachtmodell ( s. Pos. 1 ) eingebaut.

Die von dem Gaslüfter durch den Modellraum abgesaugte Gasmischung wird durch einen Schlauch ins Freie geblasen. Zusätzlich wird durch einen Kompressor die Sekundärluft, die über die Gichtwinddüsen eingeblasen wird, bereitgestellt. Mit einem Rotameter kann man das Volumen des zugeführten Gichtwindes exakt einstellen. Um die gleichmäßige Verteilung der Sekundärluft zwischen den vier Düsen zu kontrollieren, ist jeder Düsenanschluss mit einem U-Rohrmanometer verbunden. Es wurde im Modell das Verhältnis der Hauptgasstrommenge zum Gichtwindvolumen gleich der Betriebsanlage eingestellt.

## 5.2. Aufbau des Laser-Doppler-Anemometers

Zur Ermittlung der Strömungsverhältnisse wurde das Laser-Doppler-Anemometer der Firma Dantec-measurement Technologie verwendet, das am Institut für Nichteisenmetallurgie und Reinststoffe der TU-Bergakademie Freiberg bereits mehrmals erfolgreich eingesetzt wurde. [ 5, 74, 75, 76 ]



**Bild 17:** Prinzipieller Aufbau des Laser-Doppler-Anemometers [ 74 ]

Bild 17 zeigt die wesentlichen Komponenten der Messanlage. Ein luftgekühlter Argon-Ion Laser mit 100 mW Leistung erzeugt das erforderliche monofrequente, kohärente und polarisierte Licht. Der austretende Laserstrahl wird in einem prismatischen Strahlteiler in zwei Partialstrahlen zerlegt. Einer dieser Teilstrahlen wird durch einen optoakustischen Modulator ( Bragg-Zelle ) um 40 MHz frequenzverschoben. Im Transmitter können bis zu drei Wellenlängen des Laserlichts isoliert und mittels Manipulatoren in das Glasfaserkabel, das die Verbindung zur Messsonde herstellt, eingespeist werden. Beim vorliegenden eindimensionalen System wird das grüne Licht mit einer Wellenlänge  $\lambda$  von 514,5 nm als

Messstrahl verwendet. Die in der Messsonde eingebaute Sammellinse bestimmt durch ihre Brennweite die Ausdehnung des Messvolumens. Mit einer Brennweite  $f$  von 160 mm erzeugt die verwendete Sonde ein Meßvolumen von  $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$ . Weil die zur Verfügung stehende Anlage nach dem Rückstrahlverfahren arbeitet, ist in die Messsonde gleichzeitig der Fotodetektor integriert. Das am Teilchen diffus reflektierte Licht wird mittels Fotodetektor aufgenommen und über das Glasfaserkabel in den Fotomultiplier übertragen. Dort geschieht die Transformation der erfaßten Schwebungsfrequenz in elektrische Signale. Diese hochfrequenten Signale werden vom Frequenzanalysator ( Burst-Spectrum-Analyzer ) bearbeitet und in Form eines digitalen Datensatzes einer nachfolgenden Messdatenaufzeichnung und Datenverarbeitung zugeführt [ 71 ].

Mit Hilfe von Dreheinrichtung und Höheneinstellung kann man die Lage der Messstelle entlang der x- y- und z- Achsen ändern. Weil ein eindimensionales Anemometer benutzt wird, muss man die Messsonde oder das Ofenmodell drehen, um die Gasgeschwindigkeit in alle Richtungen messen zu können.

Zur Datenverarbeitung dient das Computerprogramm „Burstware“ V3.21. Zur Messung eines Geschwindigkeitswertes stand ein Zeitraum von bis zu 600 s zur Verfügung. Wenn dabei ein LDA-Signal mit mindestens 3 Perioden auftritt, wird es vom Rechner gespeichert. Falls sich weitere Bursts mit höherer Periodenzahl im Messzeitraum ergeben, werden die vorher gespeicherten Daten überschrieben. Aus diesem Grund steht zur Auswertung immer ein Wert mit maximaler Periodenzahl zur Verfügung. Für jede Geschwindigkeitsermittlung konnten bis zu 10000 LDA-Signale gespeichert werden. Nach Ablauf des Messvorganges zeigte das Programm demzufolge die entsprechende Menge der aufgenommenen Daten mit der größten Periodenzahl oder „0“ bei einer Fehlmessung. Nach beendeter Messung gibt der Rechner den Mittelwert der aufgenommenen Geschwindigkeit aus.

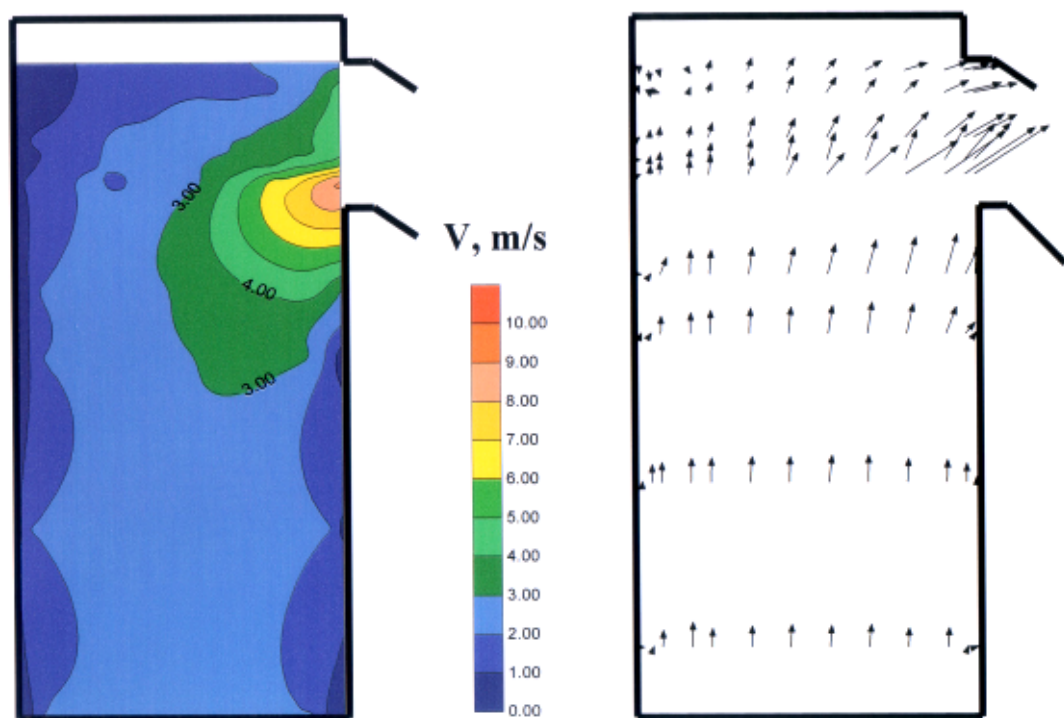
Um das gesamte Strömungsfeld im Modell des IS-Ofens zu ermitteln, wurden die Versuche im gesamten Modellraum durchgeführt. Die Gasgeschwindigkeit wird Querschnittsweise beim Einblasen von Sekundärluft gemessen. Insgesamt werden die Geschwindigkeitswerte auf einer Ebene unter den Düsen und 3 Ebenen über den Düsen aufgenommen. Um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten werden drei bis fünf Einzelmessungen für jeden Messpunkt durchgeführt.

## 6. Ergebnisse der Strömungsuntersuchungen im Modell des IS-Ofens

### 6.1. Strömungsuntersuchungen ohne Sekundärluft

Als Basis für alle weiteren Untersuchungen erfolgten zunächst die Messungen der Gasgeschwindigkeit in den Richtungen x, y und z ohne die Zuführung von Sekundärluft über die Gichtwinddüsen.

Auf der linken Abbildungen ( s. Bild 18 ) sind Linien gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Die genaue geometrische Feststellung der Strömungsprofile bereitet Schwierigkeiten, weil wegen der starken turbulenten Bewegungen im Modellraum nur zeitliche Mittelwerte gemessen werden können. Zur weiteren Veranschaulichung der Strömungsvorgänge im Modell wird noch ein Vektorbild ( s. Bild 18 rechts ) präsentiert. Die dargestellten Pfeile zeigen die Strömungsrichtungen in jedem Messpunkt. Die Länge und der Winkel der Pfeile sind von der Gasgeschwindigkeit in den Richtungen y und z und vom Ort abhängig. Sie stehen im direkten Verhältnis zum Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit. Die Vergrößerung des Bildes findet man im Anhang.



**Bild 18:** Vertikale Strömungsprofile ohne Einblasen des Gichtwindes; ( s. a. Anhang S. 155 )

Die Primärluft tritt von unten ins Modell mit einer Geschwindigkeit von über 3 m/s ein. Danach strömt sie von unten nach oben senkrecht zum Boden. Die nah an den Wänden des Modells ermittelten Geschwindigkeitswerte liegen deutlich unter 1 m/s. Auf dem Bild ist sichtbar, dass die Luft beim Übergang in den Abgaskanal ihre Strömungsrichtung ändert und

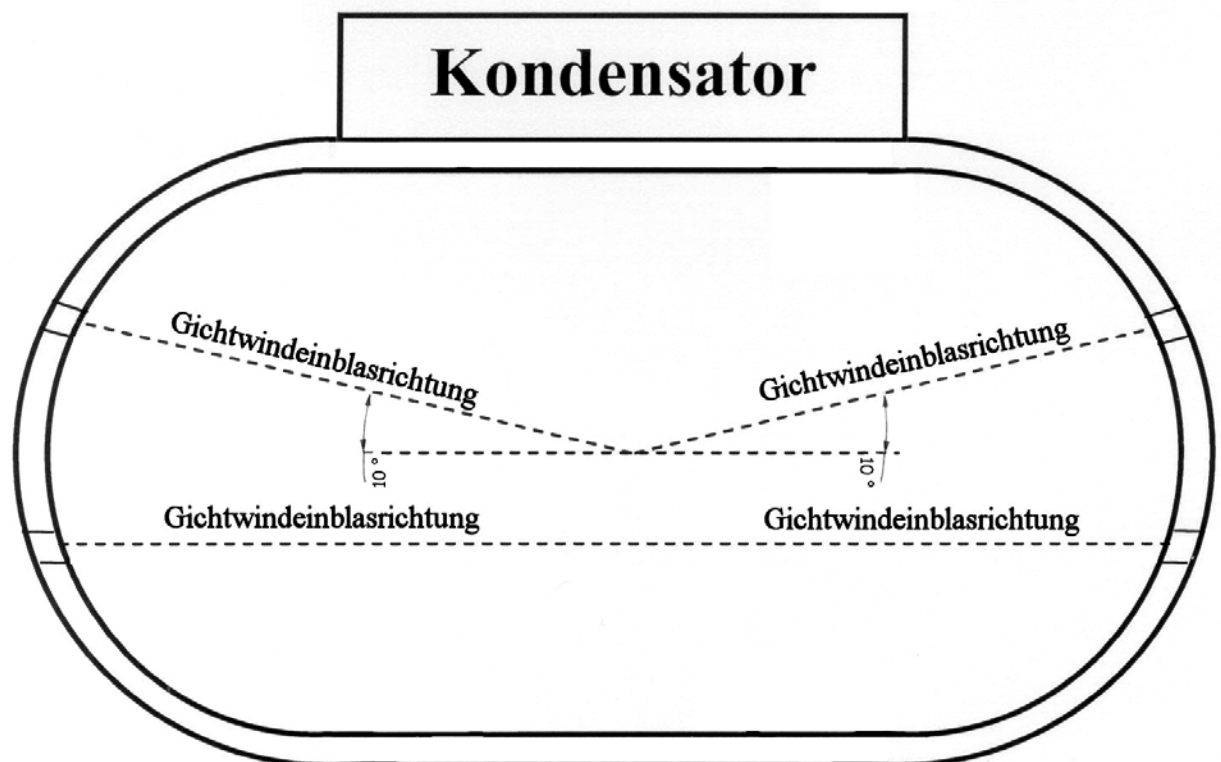
nach rechts abgelenkt wird. An der unteren Kante des Austrittes werden die Maximalwerte der Geschwindigkeit erreicht.

Auf Bild 18 ist gut zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsverteilung an der Decke nicht dargestellt ist. Auf Grund des Modellaufbaus und der beschränkten Möglichkeiten des Messgerätes ( dieser Abschnitt ist zu eng für die Laserstrahlen ) musste man auf die Aufnahme der Strömungsverhältnisse in diesem Bereich verzichten. Infolgedessen bleibt dieses Gebiet während der weiteren Untersuchungen unerfassbar.

## 6.2. Erläuterung der untersuchten Bedingungen beim Einblasen des Gichtwindes

### 6.2.1. Gichtwinddüseneinstellung im Originalofen

Die Gichtwinddüsen im Originalofen sind vier glatte Rohre mit einem inneren Durchmesser von 159 mm und mit einem äußeren Durchmesser von 196 mm. Sie stehen paarweise einander gegenüber. Der Abstand zwischen den Düsenpaaren im Ofen beträgt 1120 mm. Ihre Position kann man nicht beliebig ändern, weil sie in der Ofenwand fest eingemauert sind. Aber mit Hilfe von Ventilen ist es möglich, die Gichtwindverteilung zu variieren.



**Bild 19:** Schematische Darstellung der Position der Gichtwinddüsen bei MHD



in den Austrittskanal. Eine Gichtwinddüse, ihre horizontale und vertikale Einstellung sind auf den folgenden Bildern dargestellt [ 77 ].

### 6.2.2. Berechnung des Gichtwindvolumens

Um Veränderungen in den Strömungsbildern aufzunehmen wurde die Entscheidung getroffen, eine bestimmte Strömungssituation im Schachtofenmodell nachzustellen. Dies erfolgte für den oberen Teil des Ofens, weil dieser Bereich für Untersuchungen besonders interessant ist. Die Strömungsverhältnisse sind hier sehr stark von der Menge der aus den Gichtwinddüsen herausströmenden Sekundärluft pro Zeiteinheit abhängig.

Um ähnliche Strömungsverhältnisse im Modell zu wie im Ofen einzustellen, muss das Gichtwindvolumen dem in den Originalofen eingeblasenen proportional sein. Das kann mit Hilfe des Impulsstromes berechnet werden. Deshalb muss dieser Wert sowohl für das Original als auch für das Modell anhand der Formel ( 33 ) berechnet werden [ 64 ].

$$I = \rho_{Gas} \cdot u^2 \cdot A \quad ( 33 )$$

$I$  - der Impulsstrom in N,

$\rho_{Gas}$  - Dichte des Gases in kg/m<sup>3</sup>,

$u$  - die Geschwindigkeit in m/s,

$A$  - die Oberfläche des Schnitts, durch den eine Strömung läuft, in m<sup>2</sup>.

Zuerst wurde der Impulsstrom für das Original berechnet. Als Arbeitstemperatur wurde die im Oberofen herrschende Temperatur von 1000 °C ( 1273 K ) genommen. Dabei liegt die Dichte des Gases bei 0,273 kg/m<sup>3</sup>. Im Original beträgt der Durchmesser (  $D$  ) einer Gichtwinddüse 0,159 m, und ihre Querschnittsfläche ist entsprechend der Formel ( 34 ) also 0,0199 m<sup>2</sup>

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad ( 34 )$$

$A$  - die Oberfläche des Schnitts, durch den eine Strömung durchläuft, in m<sup>2</sup>,

$D$  - der Durchmesser in m.

Die Geschwindigkeit der durch die Düsen eingeblasenen Sekundärluft wurde aus dem gesamten Gichtwindvolumen des IS-Schachtofens abgeleitet. Wenn die Verteilung gleich ist, strömen im Ofen aus einer Düse 1000 m<sup>3</sup>/h ( bei 0 °C und 1 bar ) heraus. Bei 1000°C beträgt dieser Wert demnach 4663 m<sup>3</sup>/h oder 1,3 m<sup>3</sup>/s [ 64 ].

$$V = V_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) \quad (35)$$

$V$  - das Volumen des Gases bei der Arbeitstemperatur in m<sup>3</sup>,

$V_0$  - das Volumen des Gases bei 0°C (273 K) und 1 bar in m<sup>3</sup>,

$\alpha$  - der Volumenausdehnungskoeffizient und gleich 1/273 in Grad<sup>-1</sup>,

$t_1$  - die Arbeitstemperatur des Gases in °C.

Die Geschwindigkeit der herausströmenden Luft beträgt nach der Formel 65 m/s.

$$u = \frac{V}{A} \quad (36)$$

$u$  - die Geschwindigkeit in m/s,

$V$  - das Volumen des Gases in m<sup>3</sup>,

$A$  - die Oberfläche des Schnitts, durch den eine Strömung durchläuft, in m<sup>2</sup>.

Für das Original beträgt der berechnete Impulsstrom 20,03 N.

Mit Hilfe eines Flügelradluftströmungsmessgerätes wurde die Geschwindigkeit der aus dem Gebläse durch den Schlauch herausgehenden Luft gemessen. Der Durchmesser des Schlauches ist bekannt. Deshalb konnte das Volumen der durch das Schachtofenmodell strömenden Luft bestimmt werden. Es beträgt ca. 463000 l/h oder ~ 463 m<sup>3</sup>/h. Gemäß der technischen Daten des IS-Schachtofens ist bekannt, dass der Hauptstrom der durch das Original strömenden Ofengase bei 61300 m<sup>3</sup>/h ( bei 0°C und 1 bar ) liegt. Dieser Wert beträgt bei 1000 °C umgerechnet 285842 m<sup>3</sup>/h. Es wurde eine Proportion angenommen, welche dem Verhältnis zwischen dem Hauptstrom im Modell und dem Original gleich ist. Danach wurde dieses Verhältnis mit dem Impulsstrom des Originals multipliziert.

$$\frac{V_M}{V_O} = \frac{I_M}{I_O} \quad (37)$$

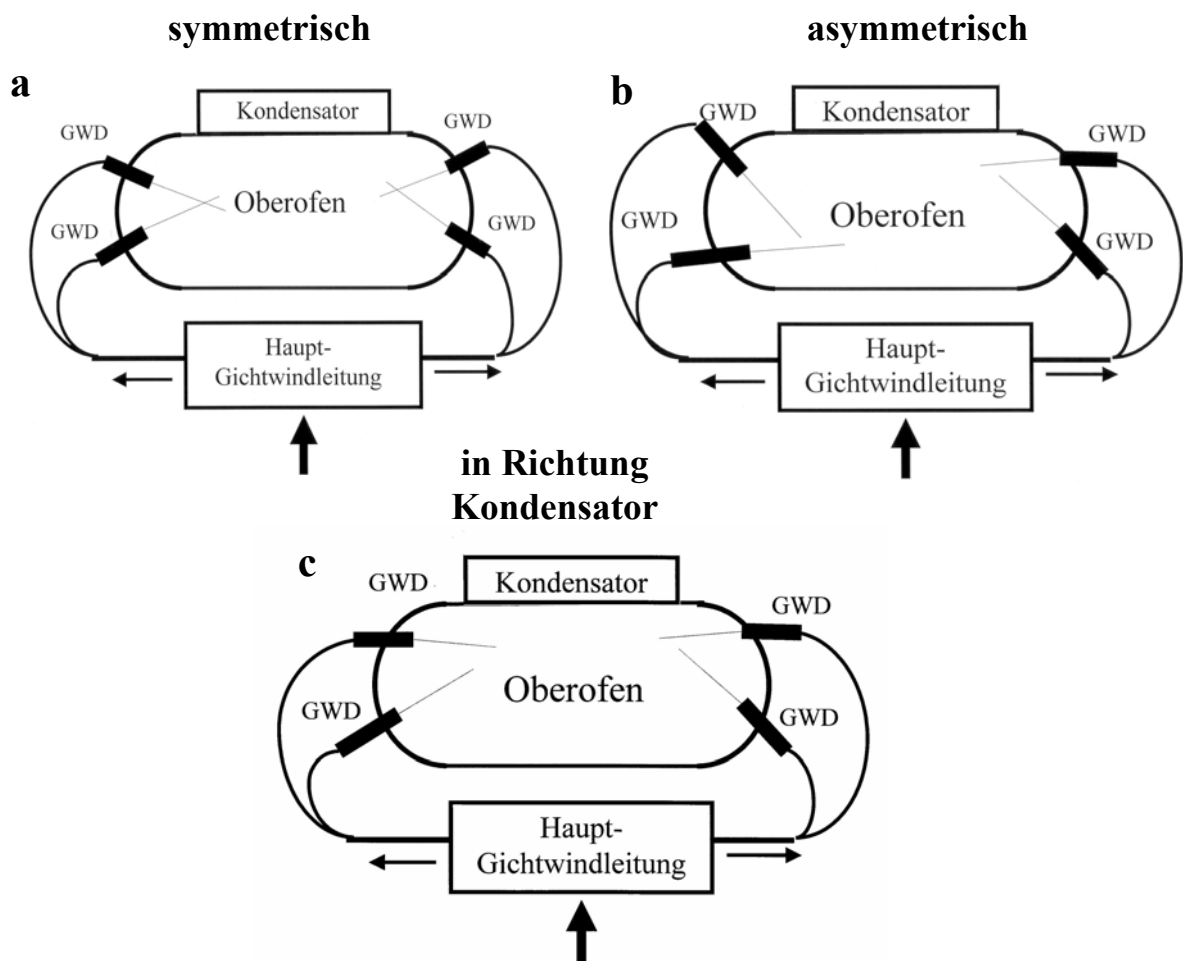
Das Ergebnis kann auf das Modell übertragen werden. Damit beträgt sein Impulsstrom 0,18 N. Die durch insgesamt vier Gichtwinddüsen eingeblasene Sekundärluftmenge wurde daraus für das Modell zu 23 m<sup>3</sup>/h berechnet. Weil das Volumen von 23 m<sup>3</sup>/h nicht dauerhaft konstant gehalten werden konnte, wurde die Entscheidung getroffen, den Wert von 20 m<sup>3</sup>/h für die nachfolgenden Untersuchungen anzunehmen.



### 6.3. Strömungsuntersuchungen beim Einblasen von Sekundärluft

#### 6.3.1. Strömungsergebnisse bei unterschiedlichen Positionen der Düsen

Es wurde darauf hingewiesen, dass die Strömungsvorgänge im IS-Ofen im Hinblick auf den spezifischen Koksverbrauch und den Wirkungsgrad eine herausragende Bedeutung haben. Eine ungleichmäßige Durchgasung des Ofenschachts verschlechtert nicht nur die Schmelzleistung, sondern erhöht auch den Koksverbrauch, weil die Reaktionsgase den Hochofen unausgenutzt verlassen und die Reaktionspartner nicht mehr in der gewünschten Weise zusammentreffen. Die Strömungsverhältnisse im oberen Teil des Ofens sind für Untersuchungen besonders interessant, weil sich hier im Ofeninnern verstärkt Ansätze bilden können. Die Gasströmung ist von der Art und Menge der aus den Gichtwinddüsen herausströmenden Sekundärluft pro Zeiteinheit abhängig. Das Einblasen bedeutet eine grundsätzliche Änderung der Abgasführung. Durch Variation der Gichtwinddüsenstellungen sollen die Ansatzbildung im oberen Ofenbereich verringert und auch die Nachverbrennung von mechanisch mitgerissenen Flugstäuben in der Imperial Smelting-Anlage verbessert werden.



**Bild 21a, b und c:** Drei horizontale Einstellungen der Gichtwinddüsen

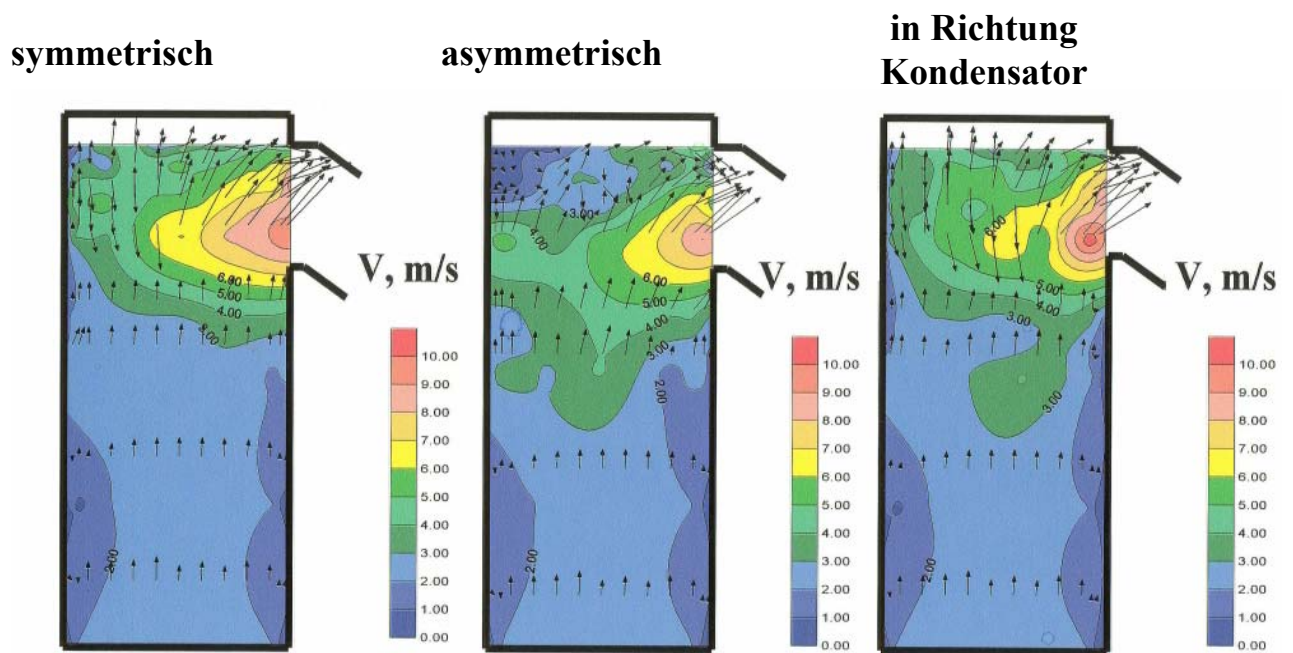
Die Erzielung vernünftiger Strömungsverhältnisse wurde durch veränderte Einstellungen der Gichtwinddüsen getestet und die Strömungsprofile im Imperial Smelting Ofenmodell aufgenommen. Zuerst wurden unterschiedliche Positionen der Düsen getestet. Sie sind auf Bild 21a, b und c dargestellt.

Bei diesen Einstellungen wurde die Sekundärluft immer horizontal ins Modell eingeblasen. Insgesamt wurden drei solche Einstellungen getestet. Zuerst wurde der Gichtwind gerade in die Modellmitte ( symmetrisch ) eingeblasen ( s. Bild 21a ). Auf dem Bild 21b ist eine andere getestete Gichtwinddüseneinstellung dargestellt. Dabei wurde die Sekundärluft nicht gerade sondern schräg ins Modell ( asymmetrisch ) eingeblasen. Dadurch können die Strömungsverhältnisse im oberen Bereich des Modells grundsätzlich verändert werden. Dies kann die Verbrennung des Kohlenmonoxides durch eine erhöhte Verweilzeit des Gichtwindes verbessern und damit auch die Ansatzbildung im oberen Teil des Modells verringern.

Als weiterer Schritt wurde eine dritte horizontale Düseneinstellung untersucht. Wie im Bild 21c zu sehen ist, wird die Luft hauptsächlich in Richtung Kondensator eingeblasen. Dabei wurde beabsichtigt, die untere Kante des Austrittes zusätzlich zu erwärmen, weil in diesem Abschnitt die größten Ansätze im Originalofen festgestellt wurden. Dabei ist eine Reduzierung der Ansatzbildung an dieser Stelle zu erwarten.

Das Bild 22 zeigt die bei den unterschiedlichen Positionen der Düsen aufgenommenen Strömungsprofile in einem Vertikalschnitt, der in der Modellmitte senkrecht zum Austritt liegt. Auf den Abbildungen ( s. Bild 22 ) sind Linien gleicher Geschwindigkeit dargestellt. Zur weiteren Veranschaulichung der Strömungsvorgänge im Modell wird auch ein Vektorbild präsentiert. Die Vergrößerungen aller Strömungsprofile sind im Anhang dargestellt.

Weil die Strömung durch das Modell eine durch ein Gebläse hervorgerufene erzwungene Konvektion darstellt, tritt die Primärluft mit einer nahezu über dem gesamten Eintrittsquerschnitt konstanten Geschwindigkeit ein. Im unteren und mittleren Teil des Schachtes ist die Strömungsverteilung bei allen drei Einstellungen fast identisch. Die Gasmischung strömt von unten nach oben parallel zur Wand. Außerdem ist zu erkennen, dass die Luft beim Übergang in den Abgaskanal ihre Strömungsrichtung ändert und nach rechts abgelenkt wird. Beim Einblasen des Gichtwindes entwickelt sich im oberen Teil des Modells eine starke Verwirbelung. In den wandnahen Bereichen ist die Geschwindigkeit entsprechend niedrig. Die Ausbildung eines Gebietes mit hohen Geschwindigkeiten ist am Austritt festzustellen. Diese Strömungsverteilung ist für alle Einstellungen charakteristisch. Aus diesem Grund wurde die höchste Gasgeschwindigkeit im unteren Abschnitt des Austrittskanals aufgenommen. Der strömungsarme Bereich des Modells ist ziemlich schmal.

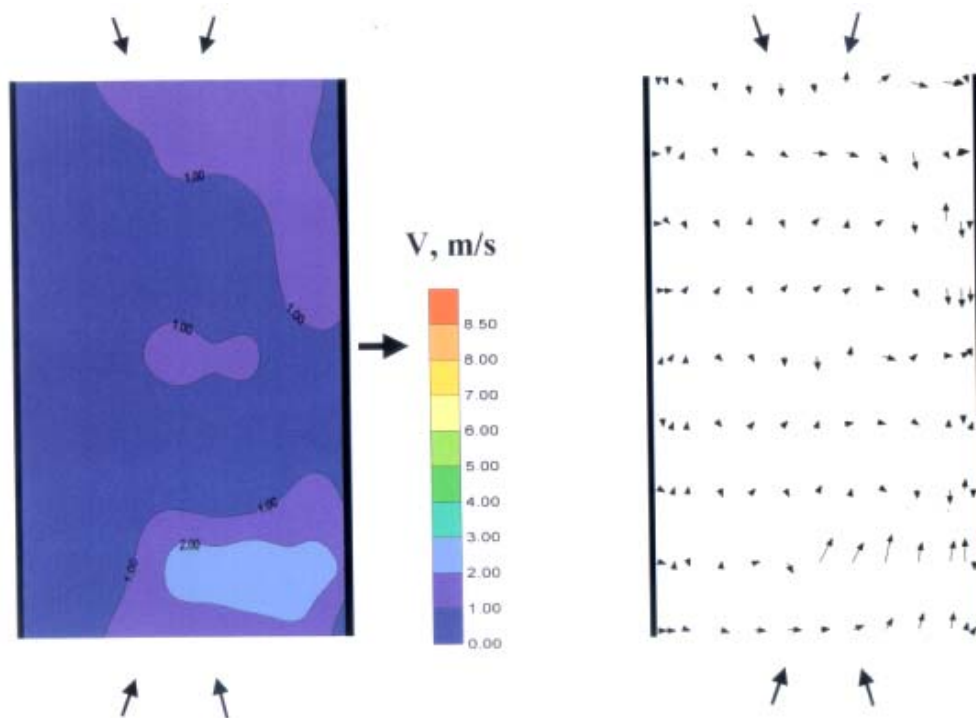


**Bild 22:** Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Positionen der Düsen;  
( s. a. Anhang Seite 156 )

Weitere Schlussfolgerungen können aus den wesentlichen Unterschieden in der Geschwindigkeitsverteilung bei den untersuchten horizontalen Gichtwinddüseneinstellungen getroffen werden.

Durch das schräge Einblasen ( s. Bild 22 Mitte ) ist ein entsprechendes Wirbelgebiet entstanden. Auf Grund dieser Düseneinstellung herrschen an der Wand gegenüber dem Austritt deutlich höhere Geschwindigkeiten. Die Geschwindigkeitsvektoren zeigen erste Tendenzen zur Umkehr der Strömung in den Übergangskanal. Sie machen anschaulich, dass die Strömung die untere Kante des Übergangs bei jeder Einstellung fast senkrecht ablöst. Dadurch kann an dieser Stelle eine Totzone entstehen, in der sich die Ansätze ausbilden können.

Bild 23 zeigt das horizontale Strömungsprofil beim Einblasen von Sekundärluft ( Schnitt unter den Gichtwinddüsen, Sicht von oben ). Es ergeben sich kleine Einlaufströmungen. Die maximale Geschwindigkeit auf dieser Höhe liegt bei 3 m/s. Man kann feststellen, dass das Einblasen des Gichtwindes in der Ebene unterhalb der Gichtwinddüsen fast keinen Einfluss auf die Primärluft ausübt. Das Abbremsen der Hauptströmung durch die Sekundärluft ist gering. Deshalb ergeben sich niedrige Geschwindigkeiten auf dem Niveau unter den Gichtwinddüsen. Die Primärluft strömt hauptsächlich in die Richtung z und wird kaum abgelenkt.

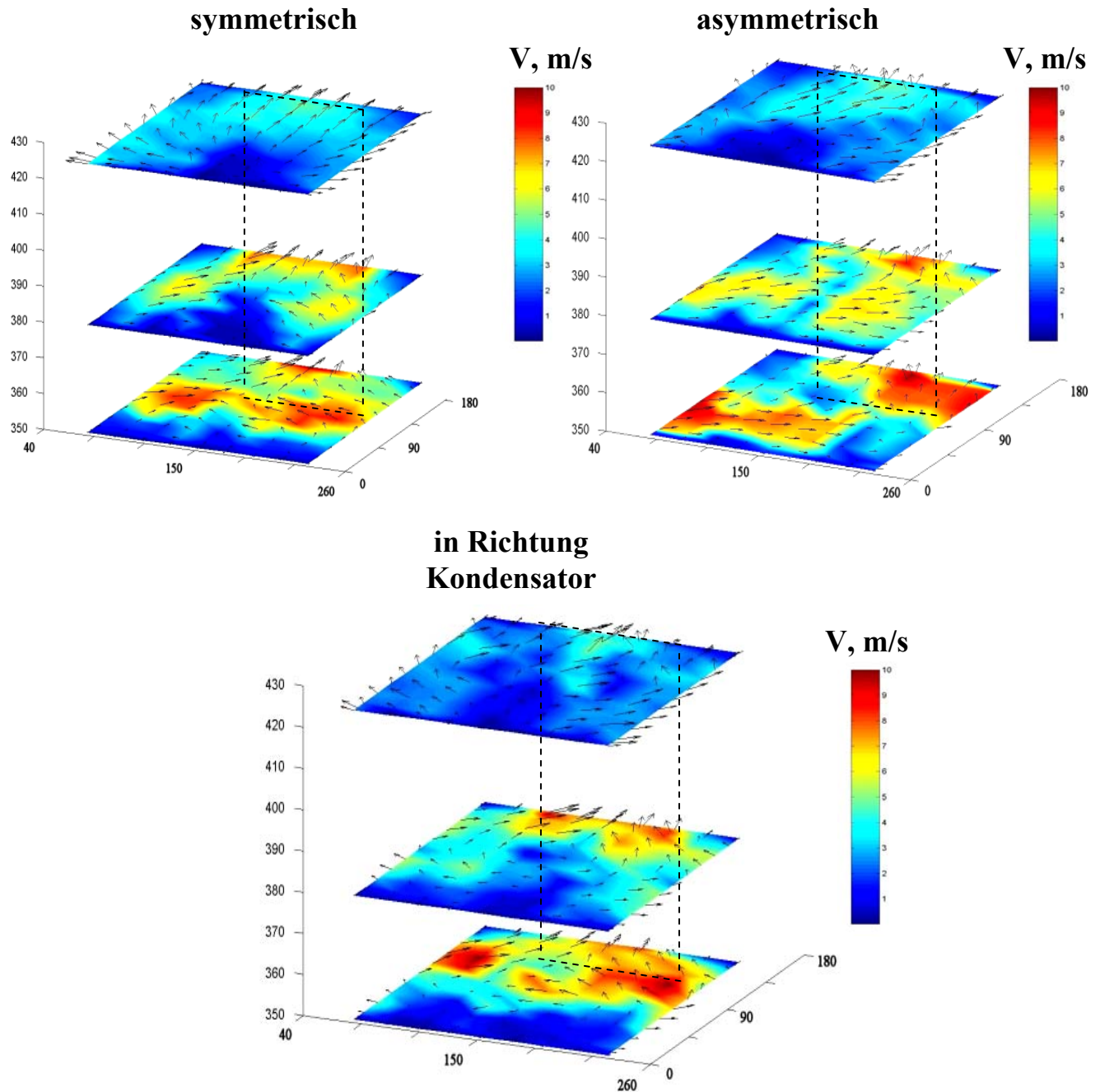


**Bild 23:** Horizontales Strömungsprofil bei den unterschiedlichen Positionen der Düsen;  
Schnitt unter den Düsen, Sicht von oben; ( s. a. Anhang Seite 157 )

Aus dem im Modell ermittelten Strömungsbild kann geschlussfolgert werden, dass die Ebenen unter den Gichtwinddüsen hinsichtlich des gesamten Ofenprofils vernachlässigt werden können. Daher wurden bei anderen horizontalen Düseneinstellungen keine Strömungsverhältnisse auf diesen Querschnitten untersucht.

Bild 24 zeigt die horizontalen Strömungsprofile beim Einblasen von Sekundärluft. Die entlang der x- und y-Achse auf verschiedenen Höhen ermittelten Geschwindigkeiten sind daraus ersichtlich. Mit einer unterbrochenen Linie ist der Austritt skizziert. Drei Profile stellen deutlich den Verlauf der Strömung im oberen Modellraum gegenüber dem Austritt dar. Diese Bilder zeigen anschaulich die im oberen Teil des Modells ablaufenden Strömungsvorgänge. Man kann gut erkennen, dass bei allen Einstellungen fast alle Gebiete bis auf einen sehr kleinen Bereich in unmittelbarer Wandnähe von der Gasströmung erfasst werden. Das Maximum der Geschwindigkeit liegt immer im Zentrum der Einlaufströmungen und beträgt ca. 10 m/s. Es ist eine relativ große Ruhezone an der Wand gegenüber dem Austritt und der Ofendecke vorhanden, wo sich Ansätze bilden könnten. Mit zunehmender Höhe sinken die ermittelten Gasgeschwindigkeitswerte.

Es ist festzustellen, dass die Geschwindigkeitsverteilung sehr stark in Abhängigkeit von den Einstellungen der Düsen variiert. Je nach deren Position weist jedes Strömungsprofil eigene Besonderheiten auf.



**Bild 24:** Horizontale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Positionen der Düsen;  
( s. a. Anhang Seite 158, 159, 160 )

Wenn der Gichtwind in die Modellmitte eingeblasen wird, tritt er symmetrisch von links und von rechts ein, deshalb ergeben sich symmetrische Geschwindigkeitszonen. Die beiden Einlaufströmungen treffen zusammen und werden dann in den Abgaskanal abgeführt. Bei dieser Einstellung sind die Zonen der strömungsarmen Gebiete an den Wänden vorhanden, die mit der Sekundärluft nicht in Berührung stehen. Dies ist für die Ofenführung ungünstig, da an diesen Stellen Ansätze entstehen können.

Ein völlig anderes horizontales Strömungsbild ergibt sich dabei bezüglich des Strömungsverlaufes und der Gasgeschwindigkeiten, wenn der Gichtwind schräg eingeblasen wird. Deutlich sind im Bereich der Einblasdüsen die sich ausbildenden Einlaufströmungen erkennbar, deren Form stark von der Düseneinstellung abhängig ist. In der Mitte dieses Schnittes tritt ein Ringwirbel auf, wobei die maximale Gasgeschwindigkeit wegen der unsymmetrischen Düseneinstellung dezentral auftritt. Die Verteilung der Strömung am Übergang ist sehr ungleichmäßig. Daraus resultiert eine relativ hohe Geschwindigkeit im Randbereich des Kanals. Durch diese Einstellung ist es jedoch nicht gelungen den Ofenquerschnitt vollständig durch Zirkulation der Strömung zu erfassen und die Totzonen zu vermeiden.

Auf Grund der Düseneinstellung, bei welcher der Gichtwind in Richtung Kondensator eingeblasen wurde, verlagert sich der Hauptströmungsbereich zum Abgaskanal hin. Dadurch entstehen Gegenströmungen, die zur Wand gerichtet sind. Gegenüber dem Gasaustritt verringert sich deutlich die Durchströmung. Die veränderte Gichtwinddüseneinstellung führt zu hohen Gasgeschwindigkeiten an den Rändern des Abgaskanals, weil die Luft direkt in diese Richtung eingeblasen wird. Dies führt zur besseren Umströmung der unteren Kante des Austrittes, wo im Originalofen die grössten Ansätze festgestellt wurden. Weil sich die höchsten Geschwindigkeiten auf den Übergangsbereich konzentrieren, entstand ein breites strömungsarmes Gebiet, das nicht nur den Wandbereich sondern auch die Modellmitte erfasst. Die Folge ist, dass die Ruhegebiete größer werden. Aus den vergrößerten Ruhezononen entstehen wiederum ungünstige Bedingungen für die IS-Ofenführung hinsichtlich der Ansatzbildung .

Die dargestellten Ergebnisse lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

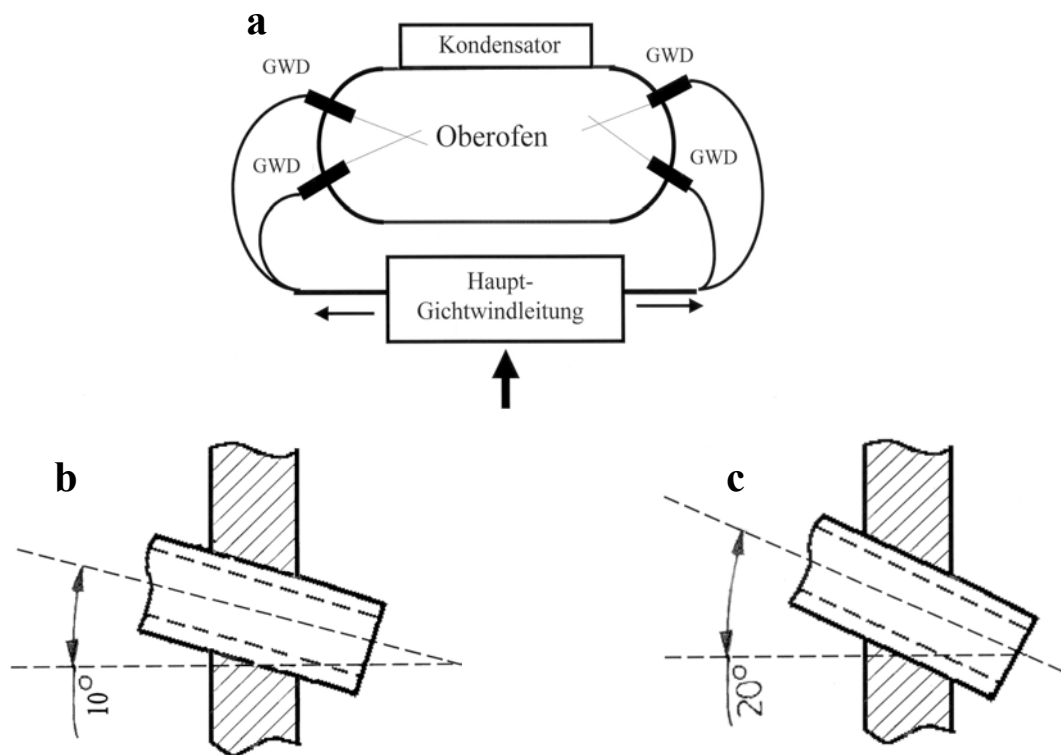
- Die Position der Düsen übt einen großen Einfluss auf die Ofenströmung aus.
- Durch die Variation der Gichtwindzuführungen kann man eine bessere Auflösung der Totzonen an den Wänden erreichen.
- Diese Positionen sind dennoch nicht optimal, da es trotzdem Ruhegebiete gibt, wo sich Ansätze bilden können.
- Durch Einblasen der Sekundärluft in die Modellmitte wurde eine gleichmäßigere Durchgasung des ganzen Querschnitts erreicht. Bei den anderen Einstellungen wurden nur bestimmte Stellen stark umströmt. Dadurch verbreiterten sich die Totzonen. Das heißt, dass die Position der Düsen, bei welcher der Gichtwind symmetrisch in die Modellmitte eingeblasen wird, am effektivsten ist. Aus diesem Grund wurde diese Einstellung bei den nachfolgenden Experimenten unter Variation von anderen Parametern näher untersucht.

- Andererseits wird die Verweilzeit des Gichtwindes bei diesen horizontalen Einstellungen deutlich reduziert, weil die Sekundärluft den oberen Modellteil sofort nach dem Einblasen verlässt. Dies kann die Ofenführung stark beeinträchtigen, da die Nachverbrennung des CO und des mechanisch mitgerissenen Staubs nicht vollständig ablaufen werden. Als Ergebnis wird der Oberofen uneffektiv erwärmt. Besonders betrifft diese Feststellung die Einstellung, bei der die Sekundärluft in Richtung Kondensator eingeblasen wird.

Die erhaltenen Ergebnisse aus der Strömungsverteilung bei der horizontalen Gichtwindzuführung sind Ausgangspunkt für die nachfolgenden Untersuchungen bei denen die Neigung der Düsen variiert wurde.

### 6.3.2. Strömungsergebnisse bei unterschiedlichen Neigungen der Düsen

Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden die geneigten Einstellungen der Gichtwinddüsen getestet. Dabei wurde ihr Neigungswinkel variiert. Die folgenden Positionen unterscheiden sich grundsätzlich von den anderen. Mit einem Neigungswinkel blasen die Düsen in Richtung Modellmitte ein, d.h. dem aufsteigenden Abgasstrom entgegen.



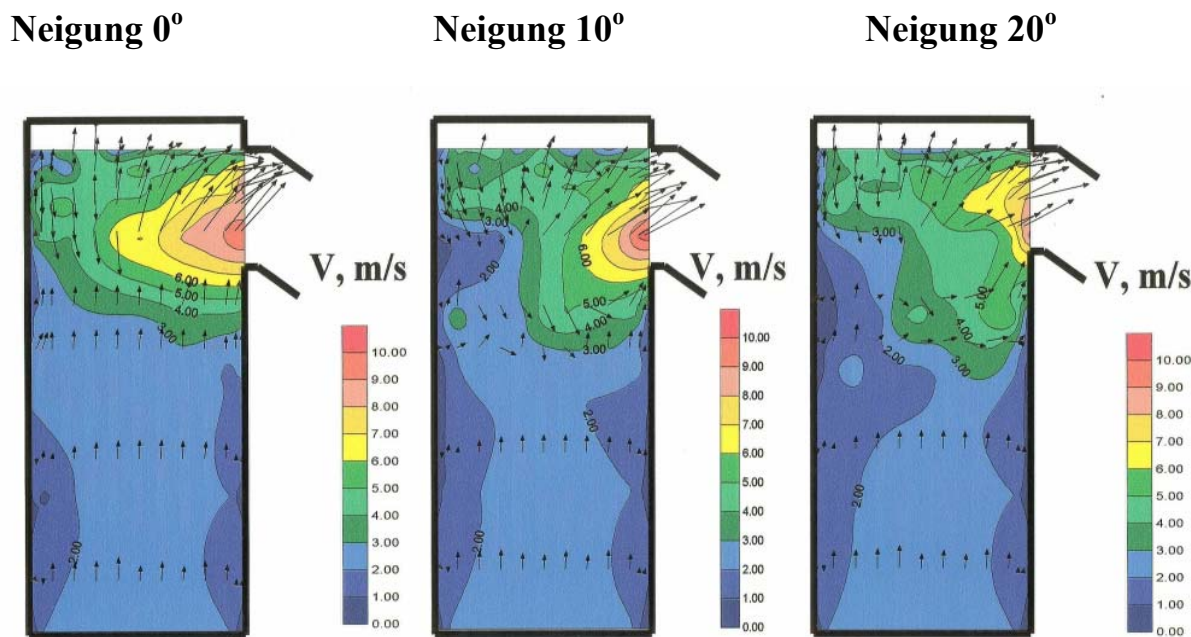
**Bild 25a b und c:** Geneigte Einstellung der Gichtwinddüsen; a – Draufsicht, b – Seitenansicht bei der Neigung 10°, c – Seitenansicht bei der Neigung 20°

Mit dieser Neigung wurde beabsichtigt, starke Wirbelbildungen zu induzieren, die bis zur Ofendecke reichen. Dadurch kann die eingeblasene Luft im Oberofen länger verweilen und strömt nicht sofort nach dem Einblasen in den Austrittskanal. Im Rahmen der Arbeit wurden die Strömungsprofile bei zwei unterschiedlichen Neigungswinkeln ( 20° und 10° ) aufgenommen und hinsichtlich der Ansatzbildung untersucht. Die geneigten Positionen der Düsen sind auf den Bildern 25b und c dargestellt.

Zur Beurteilung dieses Einflusses wurden die bei den geneigten Gichtwinddüseneinstellungen aufgenommenen Strömungsprofile mit den Ergebnissen der zentralen horizontalen Sekundärluftzuführung verglichen. In allen drei Fällen wurde die Luft in die Modellmitte eingeblasen. Die Geschwindigkeitsverhältnisse im Vertikalschnitt zeigt Bild 26. Die grundsätzlichen Strömungsprofile unterscheiden sich sichtbar von denen, die bei den



horizontalen Düseneinstellungen ermittelt worden sind. Bei Veränderung des Neigungswinkels der Düsen kann eine deutliche Tendenz in der Änderung der Strömungsprofile festgestellt werden. Es tritt eine Verschiebung des Feldes der hohen Geschwindigkeiten nach unten in die Schachttiefe auf. Mit steigendem Neigungswinkel ( $20^\circ$ ) wird diese Erscheinung noch deutlicher. Es ergibt sich eine starke Verwirbelung, die fast über die gesamte Modellmitte verläuft. Ansonsten sind die Gebiete der hohen Geschwindigkeiten bei den geneigten Einstellungen der Düsen geometrisch identisch.



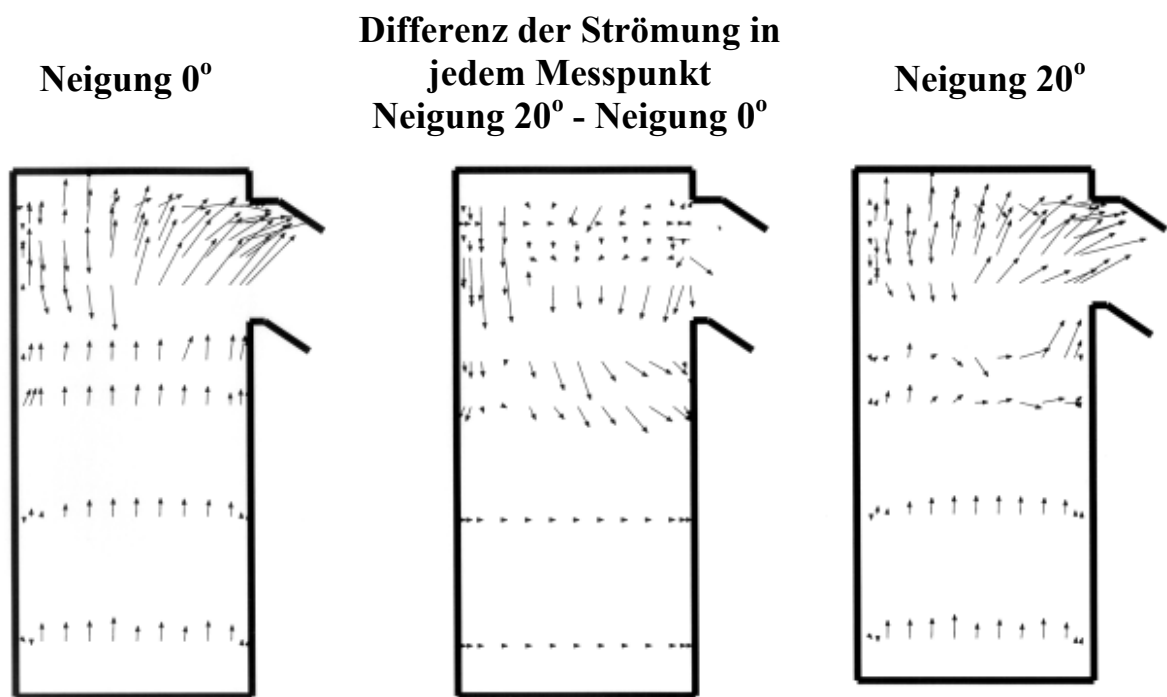
**Bild 26:** Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Düsen ( s. a. Anhang Seite 161 )

Im oberen Bereich des Modellraums hält sich die eingeblasene Sekundärluft kürzer auf und geht direkt in den Abgaskanal. Deshalb sind die gemessenen Geschwindigkeiten niedriger als diejenigen, die bei den horizontalen Einstellungen der Düsen ermittelt worden sind.

Zunächst erkennt man, dass ein strömungsreiches Gebiet an der unteren Kante des Austrittes infolge der Neigung der Düsen entsteht. Auf dem Vektorenbild ist wiederum ein scharfer Übergang der Primärluft in den Abgaskanal zu sehen. Man kann schlussfolgern, dass die Umströmung der unteren Kante des Austrittes bei den geneigten Gichtwinddüseneinstellungen der bei den horizontalen Positionen gemessenen Verteilung der Gasmischung ähnlich ist, obwohl die Primärluft nicht parallel, sondern unter einem Winkel zur Wand abläuft. Dadurch kann die Totzone an dieser Stelle sichtbar zum Teil verringert werden, wodurch auch der Wärmeaustausch begünstigt werden könnte. Deshalb können

Aussagen zur Reduzierung der Ansatzbildung bei den geneigten Positionen der Düsen getroffen werden.

Das Bild 27 zeigt die Vektordarstellungen der Geschwindigkeiten im vertikalen Schnitt bei unterschiedlichen Neigungen der Düsen. Das linke Bild ist ein Strömungsprofil, das bei der horizontalen Position der Düsen aufgenommen wurde. Die rechte Darstellung entspricht dem Neigungswinkel von  $20^\circ$ . In beiden Fällen wurde die Luft symmetrisch ins Modell eingeblasen. In der Mitte wird eine Differenzvektordarstellung präsentiert. Die Pfeillänge ist dabei die Geschwindigkeitsdifferenz in jedem Messpunkt. Die Anordnung der Vektoren zeigt die Richtung der Verlagerung der Strömung, die durch die geneigte Gichtwindzuführung verursacht wurde. Auf diesem Profil wird deutlich, dass eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Richtung der Sekundärluft von der Einstellung der Düsen besteht.



**Bild 27:** Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen

Im unteren Bereich des Modells tritt keine Veränderung der Strömung auf. Aus diesem Grund ergibt sich in diesem Abschnitt für die Differenzvektoren ein Wert von Null. Sie zeigen deutlich, dass der Gichtwind nur in der Nähe der Düsen einen Einfluss auf die Primärluft ausübt. Bis zum Schachtinneren reicht er nicht hinein.

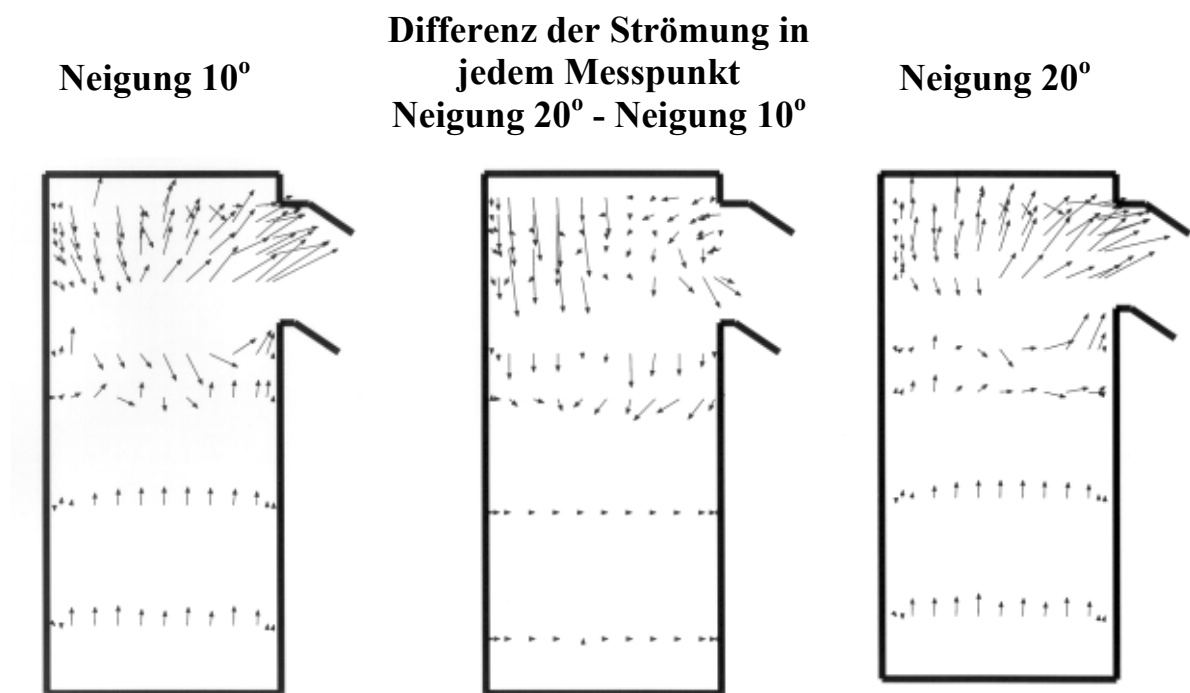
Es sei hier noch mal bemerkt, dass sich auf einem Niveau unter den Düsen ganz andere Primär- und Sekundärluftverhältnisse ergeben. Aufgrund der geneigten Gichtwindzuführung ändern sich deutlich die Richtung und die Geschwindigkeit der Strömung entlang der z-Achse. Aus Bild 27 wird klar, dass schon in dieser Höhe die Umlenkung der Primärluft

stattfindet. Es bildet sich eine Gegenströmung. Die Pfeile sind in das Schachtinnere gerichtet. Infolge der geneigten Gichtwindzuführung wurde die Strömung unter den Düsen um fast  $180^\circ$  gedreht.

Die selben Erscheinungen wurden auf Höhe der unteren Kante des Abgaskanals festgestellt. Das Differenzbild zeigt die Umkehr der Luft in diesem Modellabschnitt. Man kann deutlich erkennen, dass die Richtung der Strömung am Austritt geändert wurde. Das zeigt das Differenzbild, auf dem die Pfeile parallel der z-Achse liegen. Bei der Neigung von  $20^\circ$  tritt der Gichtwind in den Abgaskanal fast waagrecht ein. Bei den horizontalen Einstellungen der Düsen sind die Vektoren hauptsächlich an die obere Kante des Austrittes gerichtet.

Die Unterschiede der entsprechenden Vektoren im oberen Bereich des Modells sind im Vergleich zu denen im unteren Abschnitt schwächer ausgeprägt. Es ist zu erkennen, dass die Neigung der Düsen fast keinen Einfluss auf die Strömungsrichtung und Geschwindigkeit ausübt. Die Differenzvektoren sind entsprechend klein.

Die Differenz der bei den verschiedenen Neigungen der Düsen aufgenommenen Vektordarstellungen ist in Bild 28 aufgetragen. Man sieht deutlich, dass bei größerer Neigung



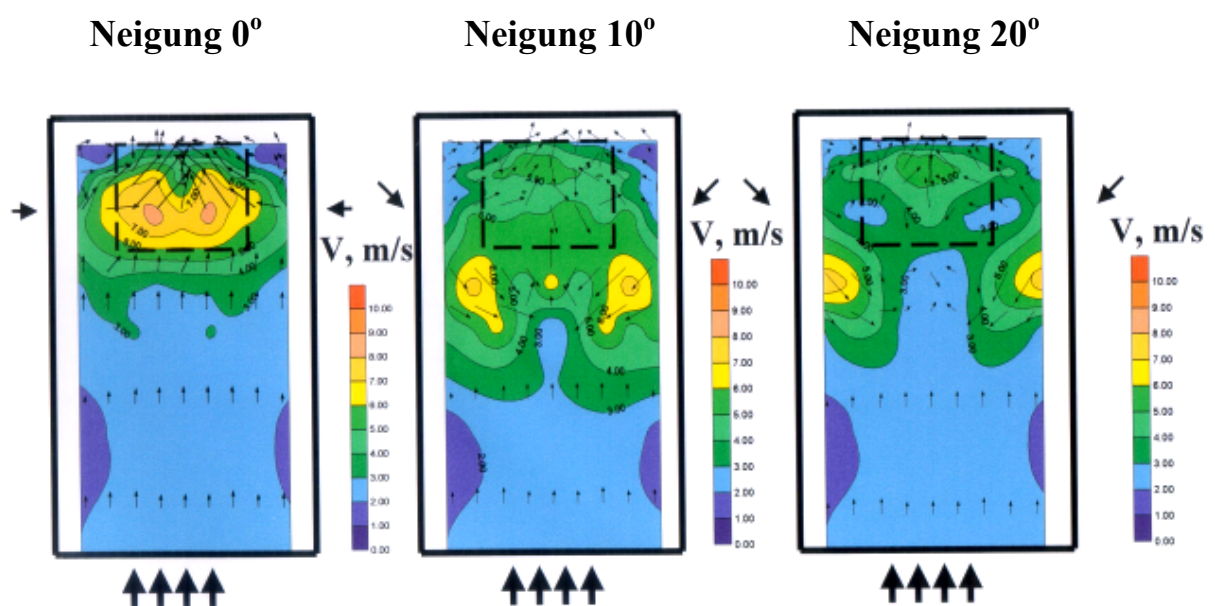
**Bild 28:** Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen

der Düsen von  $20^\circ$  eine stärkere Verschiebung des Feldes der hohen Geschwindigkeiten nach unten auftritt. Die Vektoren auf dem Differenzbild sind auf diesem Niveau in das Schachtinnere gerichtet. Der Grund dafür ist, dass der Gichtwind die Primärluft infolge der Neigung stärker umlenkt. Außerdem wurde ein Ausgleich der Strömung in der Mitte des

Querschnittes erreicht, weil die Geschwindigkeitsverteilung bei den beiden Einstellungen an dieser Stelle ähnlich ist. Daraus ergeben sich kleinere Differenzvektoren.

Wie schon geschrieben, tritt die Strömung bei der Neigung von  $20^\circ$  fast waagrecht in den Abgaskanal ein. Auf dem mittleren Bild kann man gut erkennen, dass die Differenzvektoren am Austritt nach unten gerichtet sind. Das deutet darauf hin, dass die Luft bei der Neigung von  $10^\circ$  im Vergleich zu  $20^\circ$  mehr in Richtung der Decke des Übergangsbereiches verläuft. Dabei strömt die Gasmischung die untere Kante des Abgaskanals entlang. Daraus lässt sich auf eine Totzonenausbreitung an dieser Stelle schließen.

Zur weiteren Veranschaulichung der Strömungsvorgänge im Modell ist ein zusätzlicher Schnitt gelegt worden. Im Bild 29 ist noch ein weiteres Vertikalströmungsprofil dargestellt. Dieser Schnitt befindet sich in der Modellmitte und liegt parallel zum Austritt. Mit den Pfeilen ist die Primär- und Sekundärluftzuführung ins Modell schematisch dargestellt. Mit der unterbrochenen Linie ist der Austritt skizziert. Auf diesem Bild ist der Verlauf der Strömung senkrecht zu den Gichtwinddüsen besonderes deutlich.



**Bild 29:** Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Düsen auf dem Schnitt parallel zum Austritt; ( s. a. Anhang Seite 162 )

Im unteren Teil des Modells ist zunächst die Zone mit fast gleicher Geschwindigkeitsverteilung zu erkennen. Danach kommen zwei symmetrische Einlaufströmungen, die der Sekundärluftzuführung entsprechen. Infolge des horizontalen Einblasens des Gichtwindes bewegt sich die Sekundärluft parallel zum Boden. Danach strömt sie in den Abgaskanal. Aus diesem Grund sind die Verweilzeit des Gichtwindes und die Abbremsung des Hauptstroms bei dieser Einstellung niedrig.

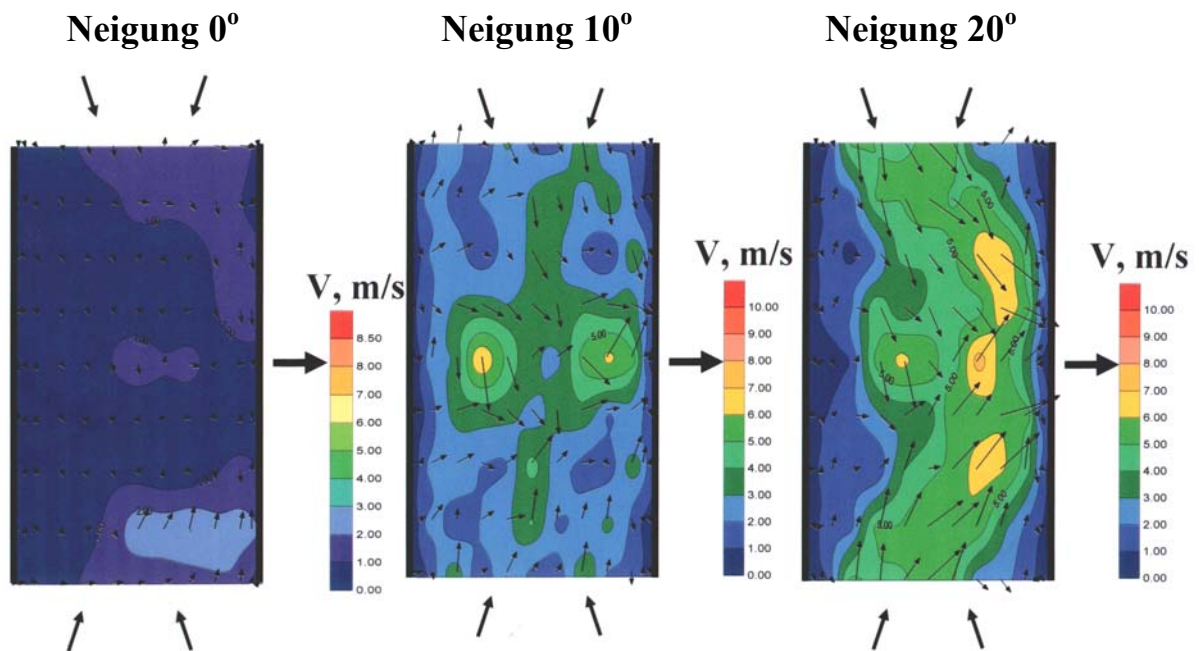
Bei den geneigten Positionen der Düsen ergibt sich eine ganz andere Strömungsverteilung im Modell. Die Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren zeigt, dass der eingeblasene Wind nach unten geneigt ist. Die zugeführte Luft wird durch die aufsteigenden Ofengase relativ schnell nach oben abgelenkt. Auf Grund der Einblaseeinstellung kommt es unter den Gichtwinddüsen zu erhöhten Geschwindigkeiten. Aus Bild 29 ist weiterhin ersichtlich, dass die Einlaufströmungen bei der Neigung von  $20^\circ$  deutlich kleiner sind als bei  $10^\circ$ . Die Erklärung dafür findet man auf dem anderen vertikalen Profil ( s. Bild 29, rechts ). Infolge der steileren Zuführung wird die Sekundärluft vom Hauptstrom zum Austritt hinverschoben. Deshalb sieht man auf dem in der Modellmitte liegenden Schnitt die Einlaufströmungen nur noch zum Teil.

Im oberen Bereich des Modells herrscht eine starke Verwirbelung, die fast alle Gebiete erfasst. In diesem relativ großen Raum ist keine bestimmte Strömungsrichtung zu erkennen. Einen Bereich mit höheren Geschwindigkeiten erkennt man gegenüber dem Modellaustritt. In dieser Zone fließt die Gasströmung in den Übergang hinein.

Die präsentierten Bilder zeigen die effektive Wirkung der geneigten Einstellungen der Düsen. Im Vergleich zum horizontalen Gichtwindeinblasen erfolgt eine bessere Verwirbelung der Gasströme im oberen Teil des Modells und die Verweilzeit der Sekundärluft nimmt ebenfalls deutlich zu. An Hand der Strömungsprofile kann man schlussfolgern, dass die Ansatzbildung durch eine geneigte Gichtwindzuführung wesentlich verringert wird.

Bild 30 zeigt die horizontalen Strömungsprofile des Schnittes unter den Gichtwinddüsen. Aus den dargestellten Strömungsprofilen können Rückschlüsse auf die Wirkung des Neigungswinkels der Düsen gezogen werden. Man kann feststellen, dass das Einblasen von Sekundärluft auf diesem Niveau einen großen Einfluss auf die Ofenströmung ausübt. Auf Grund der schrägen Gichtwindzuführung kommt es schon in dieser Höhe zu höheren Geschwindigkeiten. Durch ein verändertes Primär- und Sekundärluftverhältnis unterscheiden sich die Strömungsvorgänge bei den geneigten Düsenpositionen im ganzen Modell sichtbar von den bei horizontalen Einstellungen ermittelten Daten. Wie bereits oben erläutert wurde, tritt keine Verwirbelung auf diesem Niveau auf ( s. Bild 30, links ). Der unter den Düsen liegende Querschnitt steht nicht in Berührung mit dem Gichtwind.

Höhere Geschwindigkeiten auf diesem Niveau wurden durch das schräge Einblasen des Gichtwindes erzielt. Durch die große Neigung der Düsen treffen sich die beiden Einlaufströmungen auf einem Niveau unter den Düsen. Danach werden sie vom kräftigen Hauptstrom in den Abgaskanal transportiert.



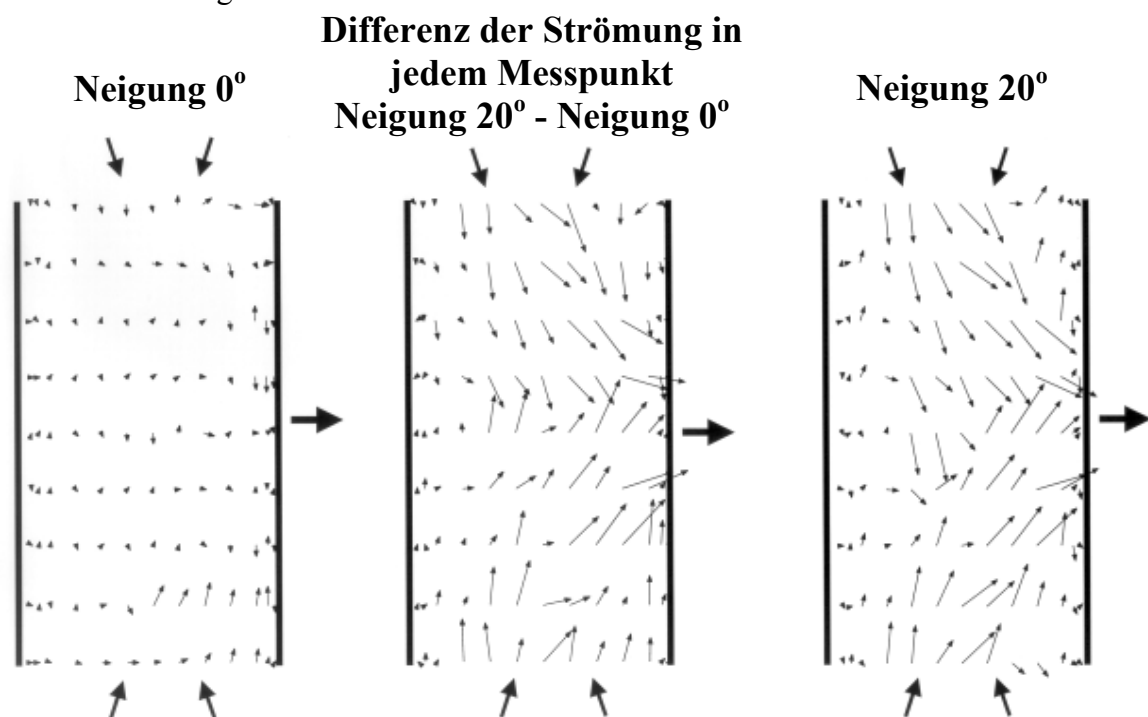
**Bild 30:** Horizontale Strömungsprofile bei geneigten Einstellungen der Düsen; Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen; ( s. a. Anhang Seite 163 )

Die Geschwindigkeitsverteilung verdeutlicht den Einfluss des Neigungswinkels auf die gesamte Ofenströmung. Damit ist auch die Erhöhung der Verweilzeit der Sekundärluft im Modell verbunden. Durch die geneigten Einstellungen der Düsen lässt sich ein positiver Trend feststellen. Auf den Bildern sind die Bereiche der höheren Geschwindigkeiten in der Nähe der Wand ersichtlich. Es wird deutlich, dass der Gichtwind von der Primärluft in Austrittsrichtung verschoben wurde. Die Ursache dafür liegt in der nachfolgenden Umlenkung der Hauptströmung in den Übergangsbereich. Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Geschwindigkeitsverteilung in den beiden geneigten Positionen der Düsen sehr ähnlich ist. Die Besonderheiten jeder Einstellung sind dabei an Hand der Bilder ersichtlich.

Für die steileren Positionen findet eine langsamere Strömungsumlenkung statt. Wegen der Neigung erstreckt sich der Bereich der hohen Geschwindigkeiten fast über den ganzen Querschnitt. Dementsprechend liegt das Gebiet der hohen Geschwindigkeiten tiefer im Modellschacht, weil der Gichtwind bei einem Winkel der Düsen von 20° steiler eingeblasen wird. Der Bereich der hohen Geschwindigkeiten dehnt sich in Richtung der Wände aus. Dadurch erfasst die Sekundärluft fast den ganzen Querschnitt. Trotzdem bleibt in unmittelbarer Wandnähe bei allen geneigten Positionen eine Totzone, die von der Gasströmung kaum erfasst wird.

Bei der Neigung von  $10^\circ$  ergeben sich kleinere Einlaufströmungen. Ursache dafür ist, dass sie sich auf einem Niveau über dem auf dem Bild dargestellten Schnitt treffen und schnell vom kräftigen Hauptstrom in den Abgaskanal umgelenkt werden. Aus diesem Grund sind die gemessenen Geschwindigkeiten im Vergleich zur anderen geneigten Einstellung deutlich kleiner. Das Profil zeigt nur den unteren Teil der beiden Einlaufströmungen.

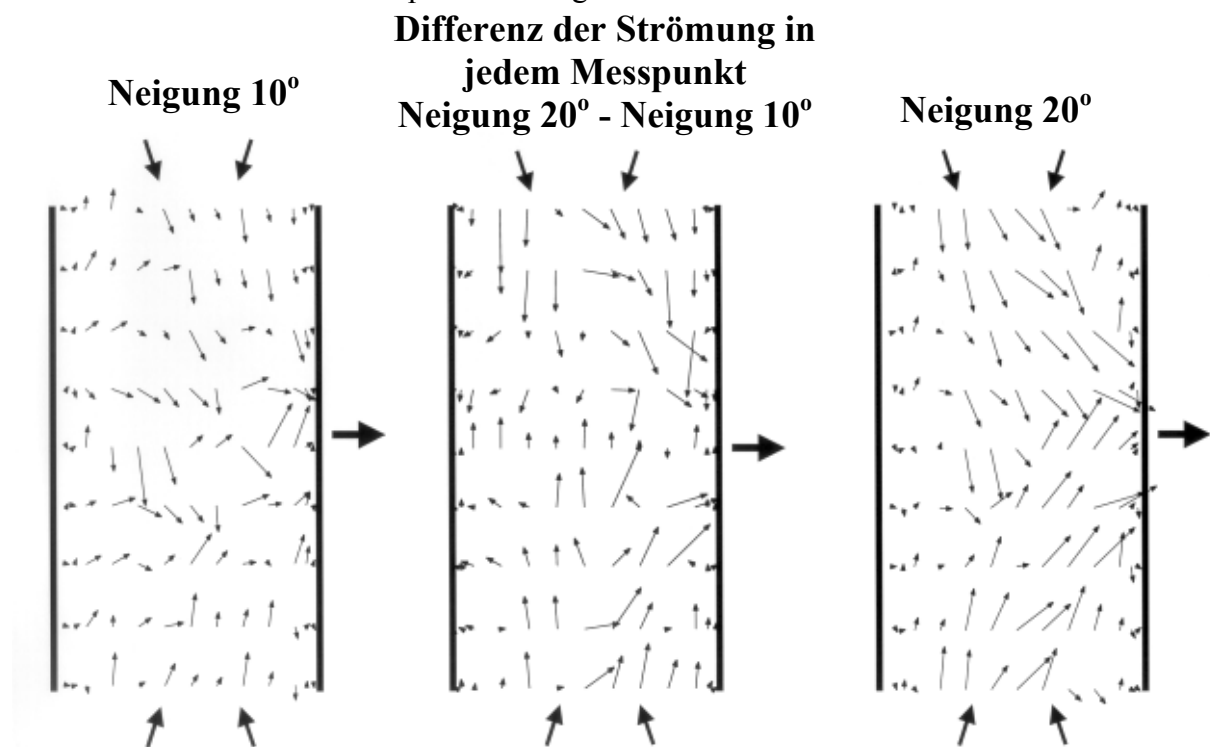
Auf dem Bild 31 ist die Differenz der auf einem Niveau unter den Düsen gemessenen horizontalen Profile zu sehen. Steigende Neigung der Düsen bewirkt einen großen Anstieg der Geschwindigkeiten in diesem Schnitt. Am deutlichsten wird die Erscheinung beim Vergleich der Vektorendarstellungen, die beim Winkel von  $20^\circ$  und  $0^\circ$  ( s. Bild 31 ) aufgenommen wurden. Zur zusätzlichen Veranschaulichung sind sie auf dem Bild nochmals dargestellt. Die Differenzvektoren zeigen, dass der aus den geneigten Düsen austretende Gichtwind in diesem Schnitt erheblich schneller ist als bei der horizontalen Einstellung. Die vorherrschenden Geschwindigkeiten sind deutlich höher. Daraus ergeben sich die längeren Pfeile auf der Differenzdarstellung.



**Bild 31:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben

Auf dem Bild 32 ist der Vergleich der horizontalen Strömungsprofile, die bei den unterschiedlichen Neigungswinkeln unter den Düsen aufgenommen wurden, zu sehen. Charakteristisch ist wieder die durch die Neigung verursachte Erhöhung der gemessenen Geschwindigkeiten. Diese Erscheinung ist in der Mitte der beiden Einlaufströmungen

besonderes deutlich. Die Differenzvektoren zeigen für beide Düseneinstellungen eine ähnliche Tendenz. Die Sekundärluft wird auf diesem Niveau vom Hauptstrom beeinflusst bzw. abgebremst. Bei der Neigung von  $20^\circ$  sind aber die vorherrschenden Geschwindigkeiten höher. Deshalb resultieren entsprechend längere Differenzvektoren.

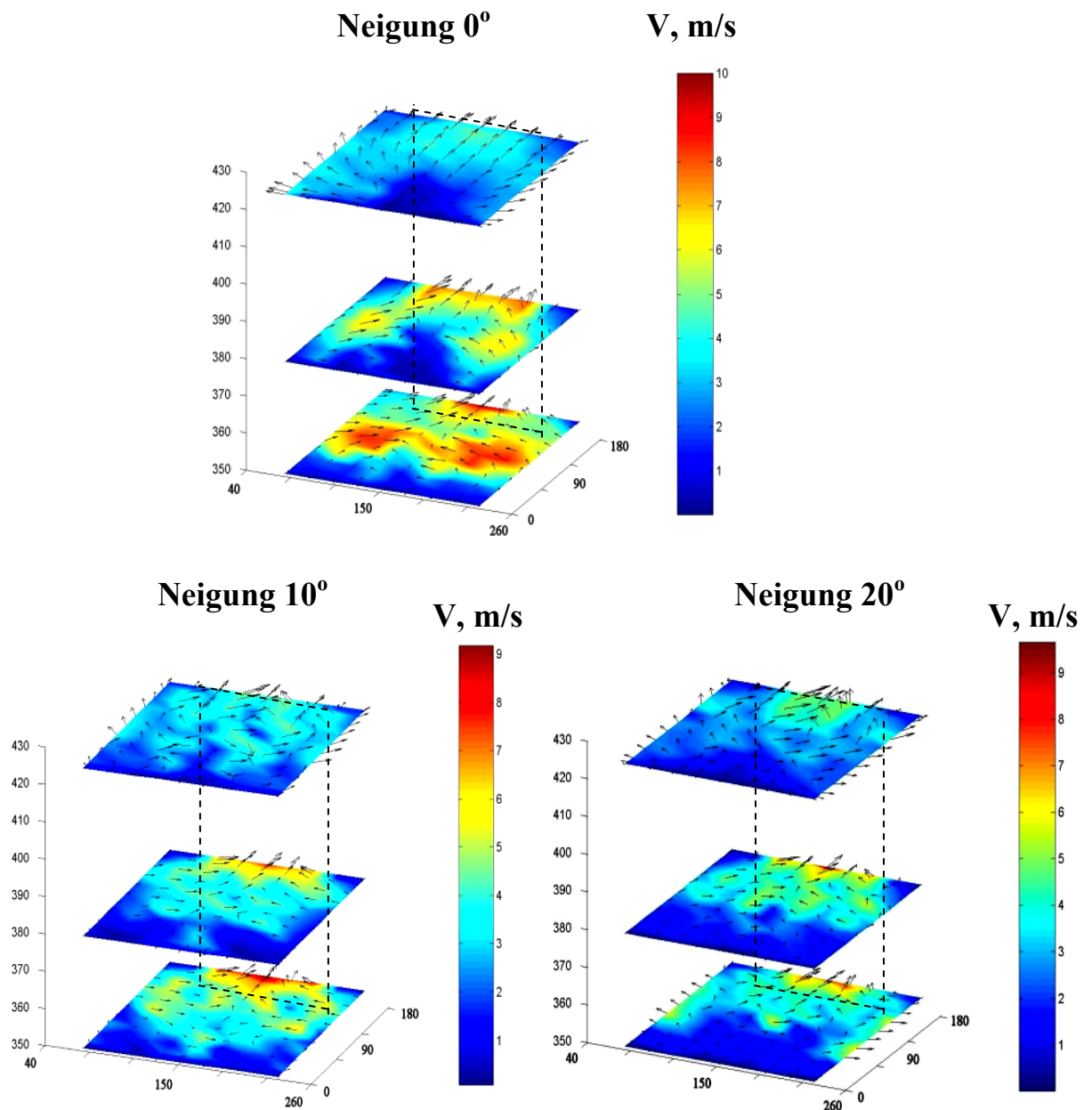


**Bild 32:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben

Bild 33 zeigt die Konturen der Geschwindigkeit im oberen Modellraum. Darauf sind die zugehörigen Darstellungen für die Geschwindigkeitsverteilung auf allen am Austritt gemessenen Schnitten entlang der x- und y-Achse zusammengestellt. Mit der unterbrochenen Linie ist der Austritt skizziert.

Wie schon beschrieben wurde, wird der obere Modellraum von der Gasmischung aufgrund der horizontalen Gichtwindzuführung fast vollständig durchströmt. Alle Gebiete, bis auf einen sehr kleinen Bereich in unmittelbarer Wandnähe werden von der Sekundärluftströmung erfasst. Bei den geneigten Einstellungen der Düsen ergibt sich ein anderes Bild. Im weiteren Verlauf der Strömung von unten nach oben konzentrieren sich die höchsten Gasgeschwindigkeiten auf den nahe zum Abgaskanal liegenden Bereich. Gegenüber erstreckt sich die Totzone. Das lässt sich folgendermaßen erklären: Die aus dem Ofen austretenden Gase strömen direkt in den Austritt. Sie treffen die eingeblasene Sekundärluft auf einem Niveau unter den Gichtwinddüsen. Danach reißt die Primärluft den Gichtwind in den Übergangsbereich mit.





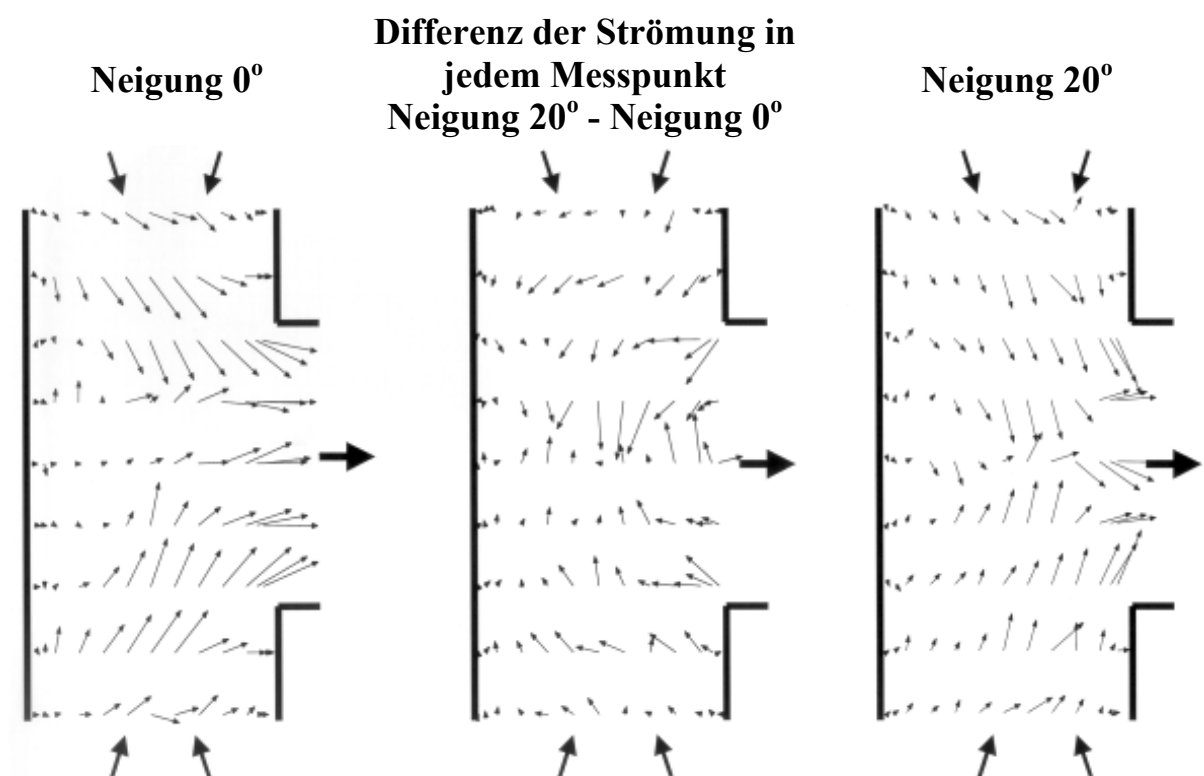
**Bild 33:** Horizontale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungen der Düsen;  
( s. a. Anhang Seite 158, 164, 165 )

Es ist festzustellen, dass die Geschwindigkeitsverteilung bei den geneigten Einstellungen übereinstimmt. Weil sich die Einlaufströmungen bei einem Winkel von 20° tief im Schachtinneren treffen, treten auf dem unteren Schnitt im Vergleich zur 10°-Neigung niedrigere Geschwindigkeiten auf. Sonst ist das Strömungsmuster in beiden Fällen ähnlich.

Als Ergebnis bilden sich im oberen Modellabschnitt größere Zonen mit schlechter Durchgasung. Im Zusammenspiel der Hauptströmung und des Gichtwindes entstehen die in Hinsicht der Ansatzbildung ungünstigen Strömungsverhältnisse. Aus den Bildern geht

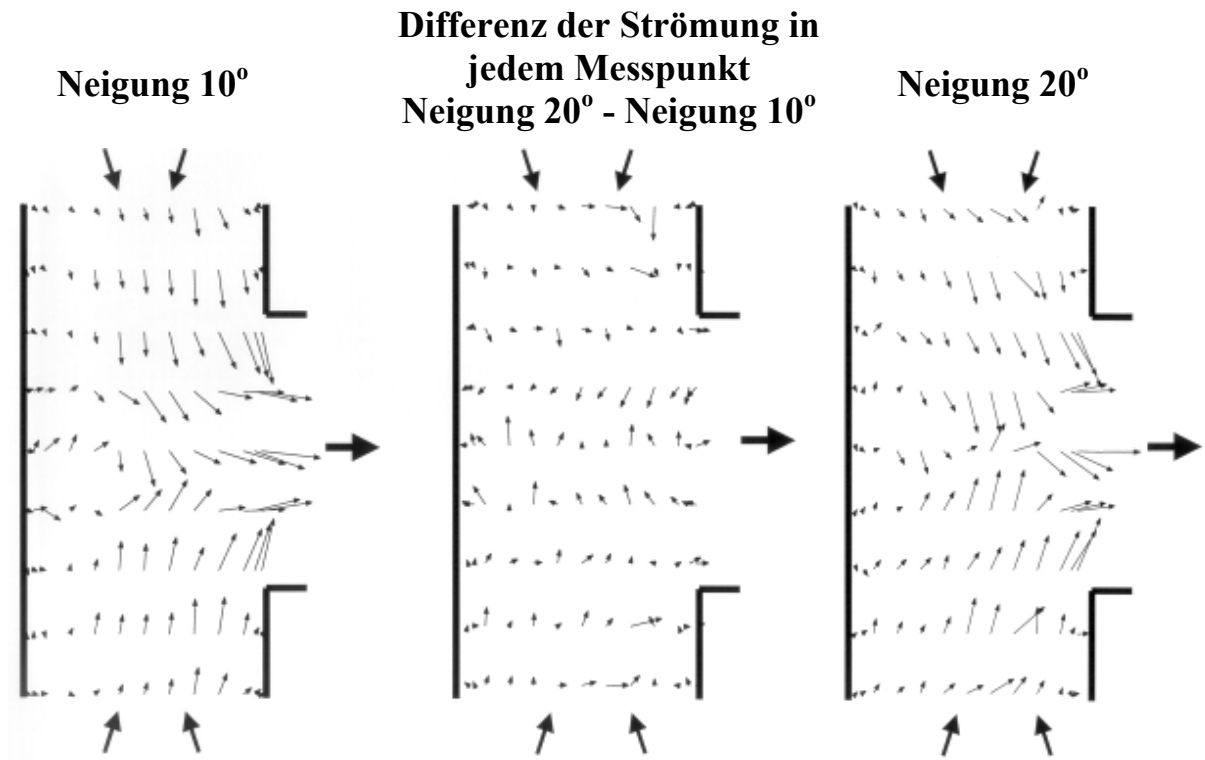
deutlich hervor, dass die wandnahen Bereiche bei dieser Einstellung der Gichtwinddüsen mit der Höhe im Vergleich zu anderen gemessenen Profilen strömungsärmer werden. Diese Stellen sind bevorzugte Gebiete für Ansatzwachstum.

Auf dem Bild 34 ist die Differenz der Strömungsprofile dargestellt, die gegenüber der Mitte des Austrittes aufgenommen wurden. Bei der horizontalen Einstellung der Düsen wurden im Vergleich zu den geneigten Gichtwindzuführungen in diesem Schnitt die höheren Geschwindigkeiten gemessen. Daraus resultieren die Differenzvektoren, die an die Wände und in die Mitte gerichtet sind. Am Austritt sind die Pfeile infolge der Geschwindigkeitsverteilung fast um  $180^\circ$  gedreht.



**Bild 34:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben

Auf dem Differenzbild ( s. Bild 35, Mitte ) der Strömungsprofile, die bei geneigten Einstellungen der Düsen aufgenommen wurden, sind die Unterschiede nicht so markant. Die Geschwindigkeit liegt in beiden Fällen in einer Größenordnung. Aus diesem Grund ergeben sich relativ kleine Differenzvektoren, welche die Ähnlichkeit der erhaltenen Strömungsverhältnisse auf diesem Niveau anschaulich bestätigen.



**Bild 35:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben

Beim Vergleich der Geschwindigkeitsfelder gelangt man zu folgenden Schlussfolgerungen:

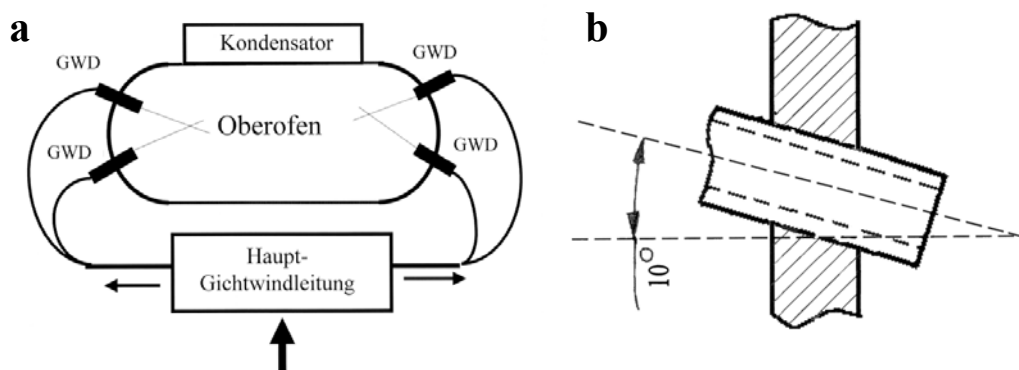
- Bei den beiden geneigten Einstellungen der Düsen wurde eine effektive Vermischung des Gichtwindes mit der Primärluft auf einem Niveau unter den Düsen erreicht. Daraus resultiert eine größere Verweilzeit der Sekundärluft im oberen Teil des Modells. Als Folge ist eine deutliche Reduzierung der Ansatzbildung im Vergleich zu dem horizontalen Einblasen des Gichtwindes zu erwarten.
- In der Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren wird deutlich, dass die Gasströmung in Richtung Austritt verläuft, jedoch nicht bis an die Wände und Ecken des Querschnitts hinführt. Das lässt auf die Neigung zur Ansatzbildung an der unteren Austrittskante schließen.
- Bei der Neigung von 20° wird der Gichtwind steiler eingeblasen und kann in Berührung mit dem Möllerniveau kommen. Als Ergebnis können die kräftigen Einlaufströmungen die kleinen Beschickungsteile mitreißen. Dadurch wird der Staubaustrag aus dem Ofen begünstigt. Um diesen Vorgang zu vermeiden und andererseits die hohe Verweilzeit der Sekundärluft zu erhalten, sollte die Neigung der Düsen geändert werden. Ein Einblaswinkel von 10° hat sich als günstig erwiesen.

- In Bild 30 ist deutlich zu sehen, dass die Einlaufströmungen durch die aufsteigende Primärluft relativ schnell nach oben abgelenkt werden. Um die Verwirbelung und die damit verbundene Verweilzeit zu erhöhen, kann man die Menge des Gichtwinds vergrößern. Auf diese Weise kann die schräg eingeblasene Sekundärluft den Hauptstrom zusätzlich abbremesen.

Daraus entsteht die Notwendigkeit, den Einfluss der Gichtwindvolumina auf die Ofenströmung bei einer Neigung von  $10^\circ$  näher zu untersuchen.

### 6.3.3. Strömungsergebnisse bei unterschiedlichen Gichtwindvolumina

Bei den bisherigen Versuchen wurde immer eine konstante Gichtwindmenge von 20 m<sup>3</sup>/h eingeblasen. Eine bessere Verwirbelung der Primär- und Sekundärströmungen kann auch durch Variierung der Gichtwindvolumina erreicht werden. Es kommt zu einer zusätzlichen Abbremsung der Ofengase. Dies kann zur besseren Durchwärmung im Oberofen und gleichzeitig zur Abnahme der Ansatzbildung führen. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der Gichtwindvolumina auf die Ofenströmung untersucht.

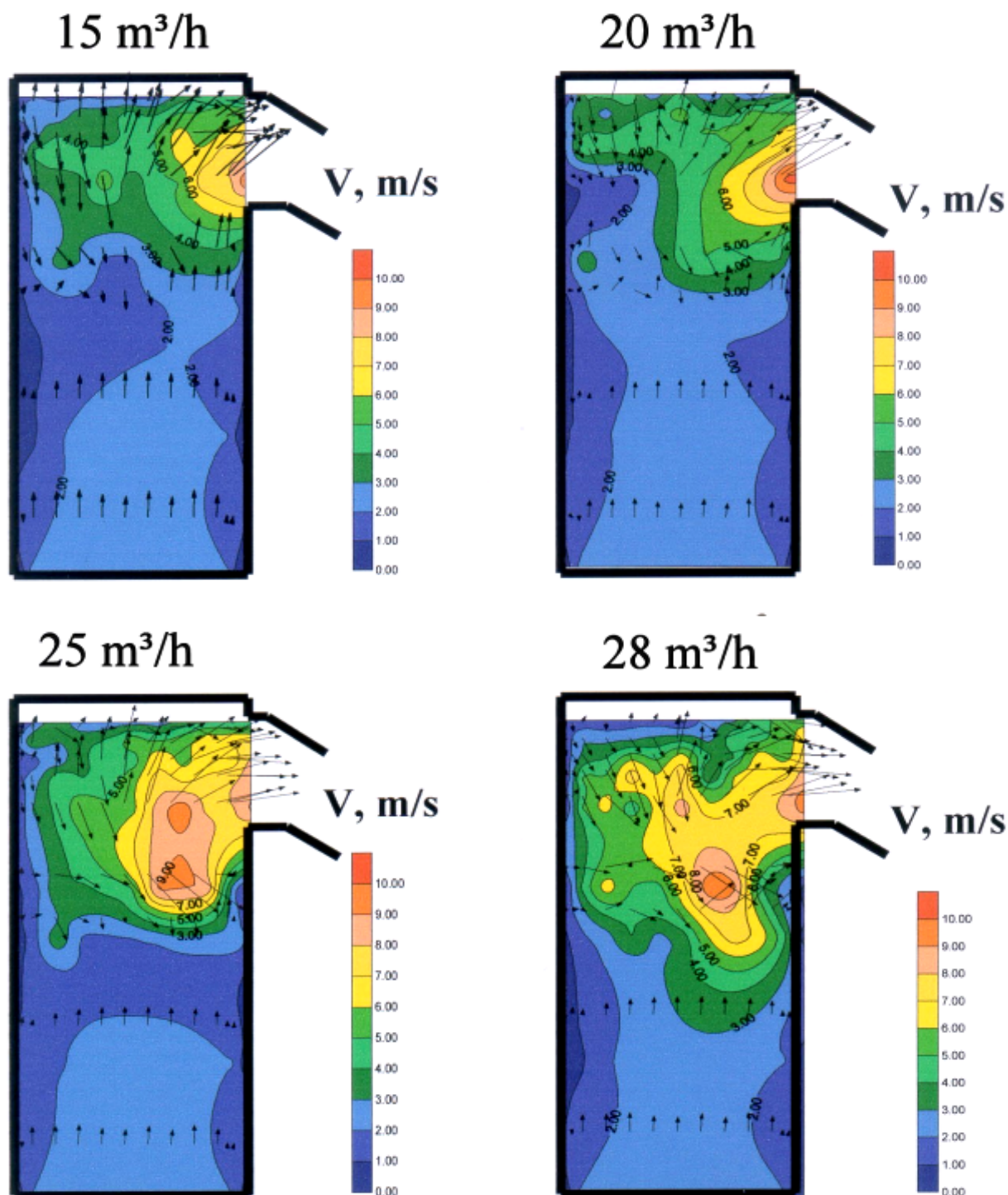


**Bild 36a und b:** Einstellung der Gichtwinddüsen bei den Untersuchungen mit verschiedenen Gichtgasvolumina; a – Draufsicht, b – Seitenansicht

Dabei wurde der Gichtwind unter einem Neigungswinkel von 10° in die Modellmitte ( s. Bild 36 ) eingeblasen. Um die Wirkung festzustellen, wurde zuerst 25 % weniger Sekundärluft ( 15 m<sup>3</sup>/h ) eingeblasen. Danach wurde der Gichtwindvolumenstrom um 25 % von 20 m<sup>3</sup>/h auf 25 m<sup>3</sup>/h erhöht. Zum Schluss dieser Versuchsreihe wurden 28 m<sup>3</sup>/h ins Modell eingeblasen. Die aufgenommenen Profile geben den Einfluss des Gichtwindvolumenstroms auf die Vorgänge im Oberofen anschaulich wieder.

Im Bild 37 sind die vertikalen Strömungsprofile dargestellt. Aus den gewonnenen Ergebnissen wird eine deutliche Abhängigkeit der Geschwindigkeitsverteilung von der Sekundärluftzuführung ersichtlich. Durch eine Erhöhung der Gichtgasvolumina wächst die Strömungsgeschwindigkeit in Verbindung mit der Zunahme der Verwirbelung im oberen Teil des Modells erheblich. Dabei wird die Primärluft stärker abgebremst. Der Hauptstrom lenkt aufgrund des schräg eingeblasenen Gichtwindes nicht sofort um, dadurch gelingt es, die Verweilzeit des Gichtwindes zu erhöhen. Es lässt sich eine einheitliche Tendenz erkennen. Die Vergrößerung der Gichtgasvolumina bewirkt eine Verringerung der strömungsarmen Bereiche an den Wänden. Der Einfluss verstärkt sich mit weiterer Zunahme der Menge der Sekundärluft. Überraschenderweise ergibt sich die größte Geschwindigkeit in der Mitte des oberen Modellteils und zwar an der Stelle, wo sich die beiden Einlaufströmungen treffen.

Sonst sind die Unterschiede der beiden Profile aufgrund der Gasumlenkung nicht markant. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft am Austritt beträgt ca. 10 m/s. Das stimmt mit den bei den anderen Einstellungen aufgenommenen Strömungsprofilen überein.



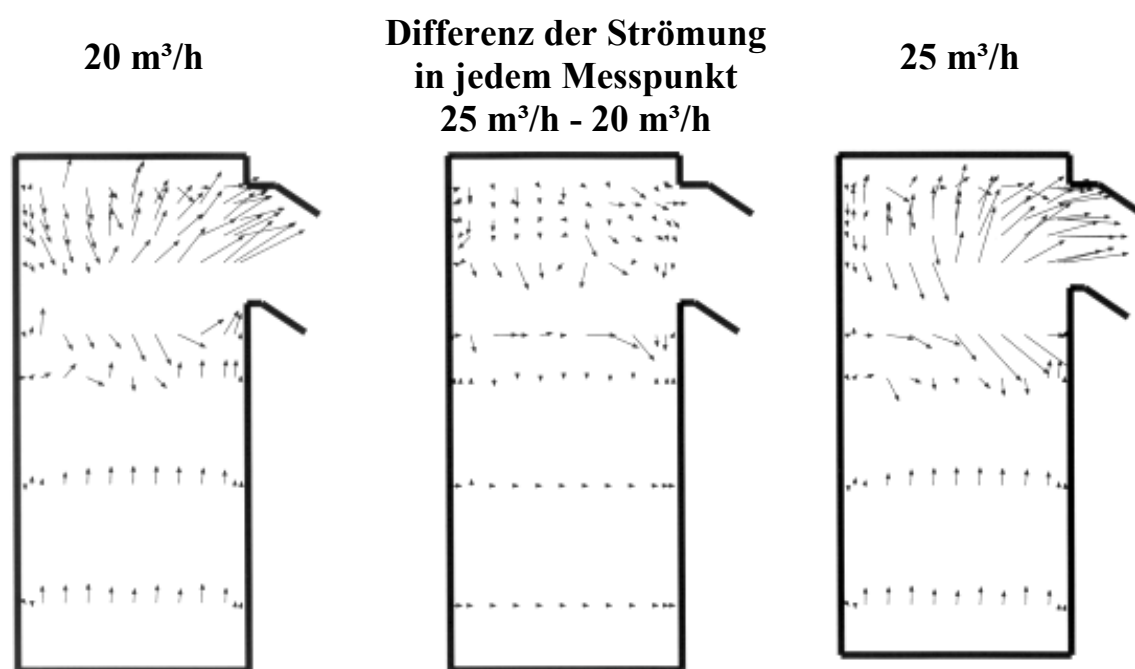
**Bild 37:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina;  
( s. a. Anhang Seite 166, 167 )

Mit abnehmendem Gichtgasvolumen ( auf  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  ) wird ein markantes Absinken der Gasgeschwindigkeiten deutlich. Es ergeben sich deutliche Veränderungen der Strömung in diesem Schnitt im oberen Teil des Modells. Man kommt zu dem Ergebnis, dass der Einfluss des Gichtwindes auf die Primärluft bei diesem Volumen gering ist.

Aus der Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren lässt sich ein positiver Trend hinsichtlich der Ansatzbildung erkennen. Infolge der Erhöhung der Gichtwindvolumina kommt es zu einer komplett anderen Form der Umströmung der unteren Kante des Austrittes. Es ist deutlich zu sehen, dass die Gasmischung fast senkrecht zu dieser Stelle ausgerichtet ist. An der Wand liegen die zugehörigen Vektoren fast parallel zum Boden (  $90^\circ$  ) zur Primärlufttrichtung oder sind sogar schräger (  $>90^\circ$  ). Aus den erhaltenen Strömungsprofilen kann man folgenden Schluss zur deutlichen Verringerung der Ansatzbildung durch die Zunahme des Wärmeaustausches an der unteren Kante des Abgaskanals ziehen.

Man erhält einen solchen Verlauf der Strömung schon bei Erhöhung der Gichtgasvolumina um 25 % von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  auf  $25 \text{ m}^3/\text{h}$ . Diese Wirkung wird mit der nachfolgenden Erhöhung der Menge der Sekundärluft ( auf  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  ) noch anschaulicher.

Bild 38 zeigt die Profile, die bei verschiedenen Gichtgasvolumina aufgenommen wurden. Aus der mittleren Vektordarstellung lassen sich wichtige Einblicke in die Unterschiede der Strömungsverhältnisse gewinnen. Aus der erhaltenden Geschwindigkeitsverteilung kann man auf die Differenz zwischen den Profilen schließen bzw. feststellen, wie die Strömung durch die Variation der Gichtgasvolumina im Modell beeinflusst wird.

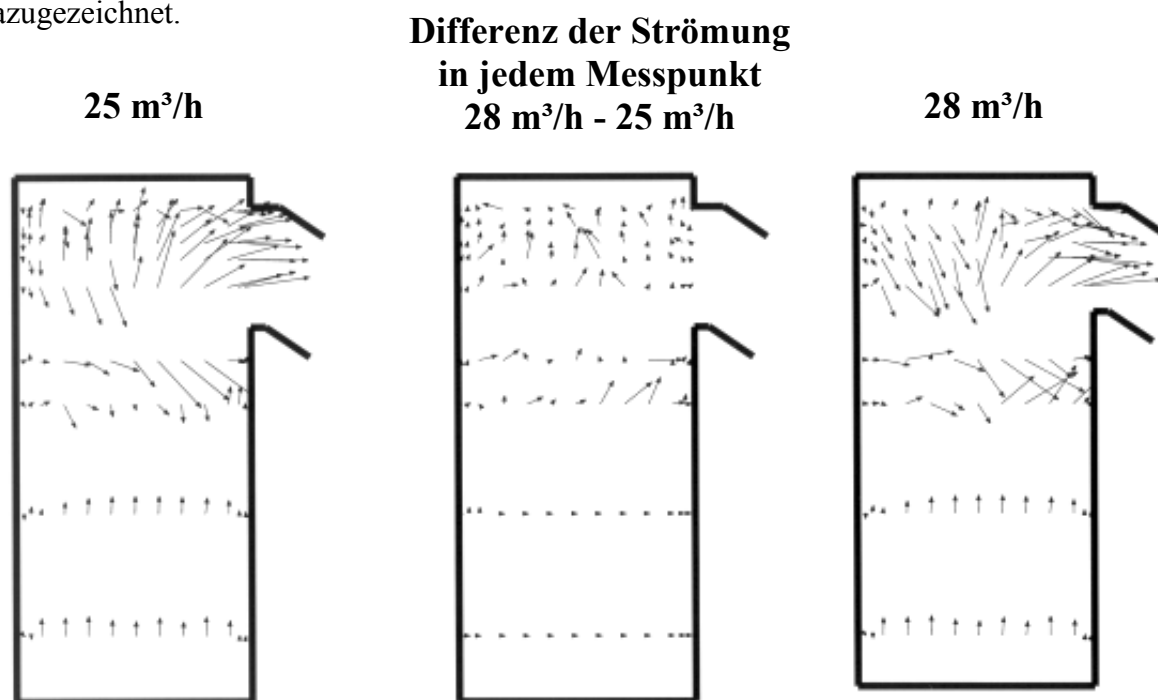


**Bild 38:** Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina

Die Unterschiede treten hauptsächlich auf dem Niveau unter den Düsen auf. Es ist gut zu erkennen, dass eine Zunahme des Gichtwindvolumens von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  auf  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  eine deutliche Erhöhung der Geschwindigkeit hervorruft. Die Vektoren zeigen auch auf dem mittleren Bild, dass die Strömung ihre Richtung ändert. Sie wird unter der Wirkung des erhöhten Gichtgasvolumens zur Wand verschoben. Das zusammen beeinflusst die Vektoren, die ihre Länge und Richtung auf dem Niveau unter den Düsen ändern. Mit der Erhöhung des Gichtgasvolumens wird die Vermischung der Sekundär- und Primärluft verbessert.

Im oberen Teil des Modells sind die kurzen Pfeile zu sehen, welche der typischen Geschwindigkeitsverteilung in diesem Abschnitt entsprechen. Es ist zu erkennen, dass die Vektoren am Austritt nach unten gerichtet sind, d.h. durch die Erhöhung des Gichtgasvolumens auf  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  tritt eine leichte Umkehr der Strömung auf. Die Gasmischung tritt in den Abgaskanal fast parallel zum Boden ein. Dadurch soll die Umströmung der unteren Kante des Austrittes begünstigt und die Totzonenentwicklung reduziert werden.

Nach  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  wurden die Strömungsverhältnisse bei einem Gichtwindvolumen von  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  gemessen ( s. Bild 39 ). Links und rechts sind die erhaltenen Vektorprofile dargestellt. Damit man die Unterschiede besser erkennen kann, ist das Differenzbild in der Mitte dazugezeichnet.



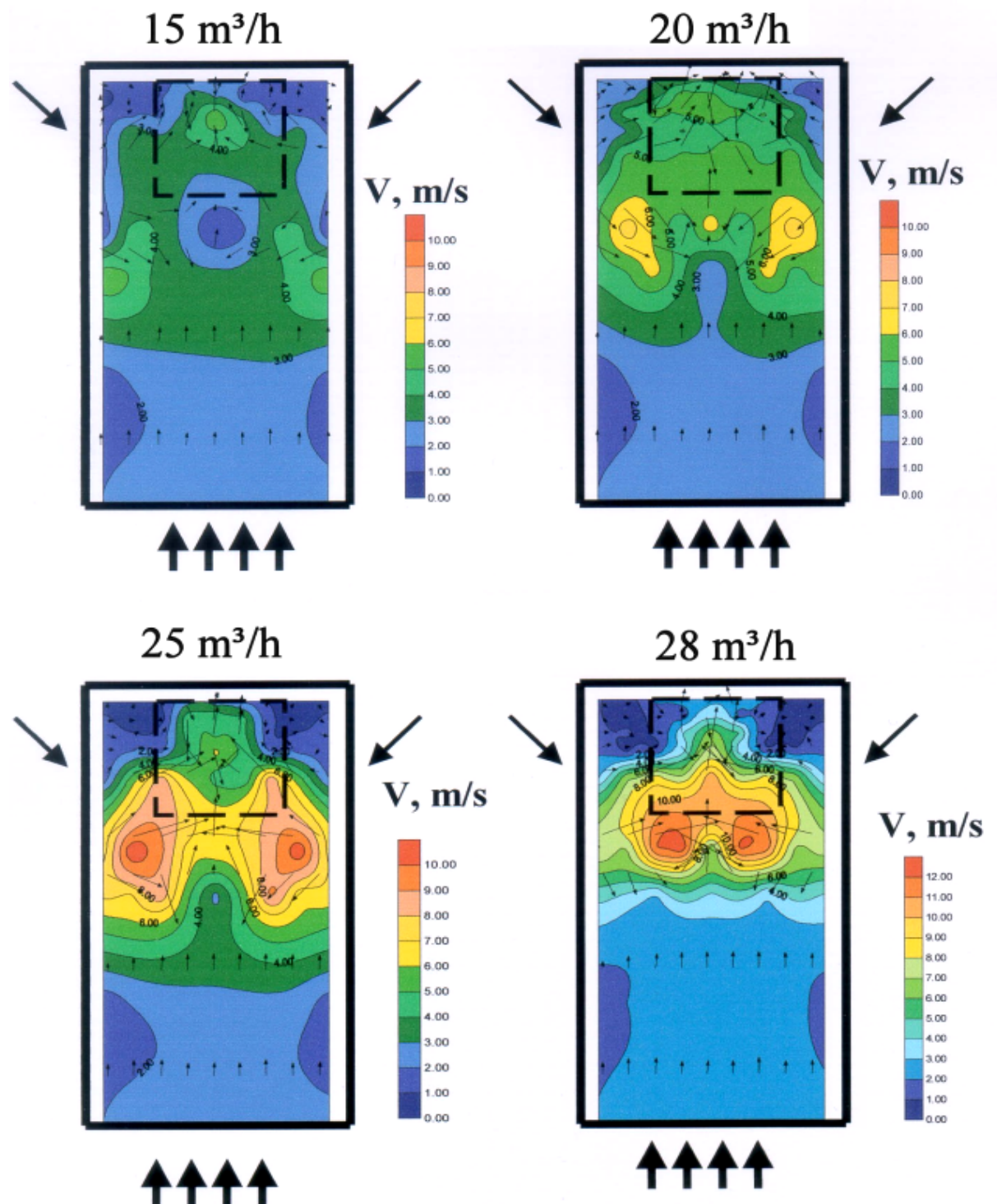
**Bild 39:** Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina

Das Feld der hohen Geschwindigkeiten wandert mit der Zunahme des Gichtwindvolumens nach unten. Die Differenzvektoren verdeutlichen diesen Vorgang. Es ist gut zu erkennen, dass der Einfluss der Gichtwindvolumina auf die Ofenströmung hauptsächlich unter den Düsen



wirksam wird. Das Differenzprofil widerspiegelt die Verlängerung der Vektoren bei  $28 \text{ m}^3/\text{h}$ , weil dabei auf diesem Niveau höhere Geschwindigkeiten herrschen.

Im oberen Bereich des Modells häufen sich dagegen die kleinen Pfeile, weil die Unterschiede der erhaltenen Strömungsbilder geringfügig sind. Das Gichtwindvolumen spielt hier so gut wie keine Rolle, was die kurzen Differenzvektoren anschaulich beweisen.



**Bild 40:** Vertikale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina auf dem Schnitt parallel zum Austritt, Einblaswinkel  $10^\circ$ ; ( s. a. Anhang Seite 168, 169 )

Bild 40 zeigt die Strömungsprofile im Querschnitt, der in der Modellmitte parallel zum Austritt liegt. Darauf sind auch die Geschwindigkeitsverteilung entlang der x- und z-Achse sowie die zugehörigen Vektoren dargestellt. Die Primär- und Sekundärluftzuführung ins Modell ist mit den Pfeilen schematisch skizziert. Die unterbrochene Linie zeigt die Konturen des Austrittes.

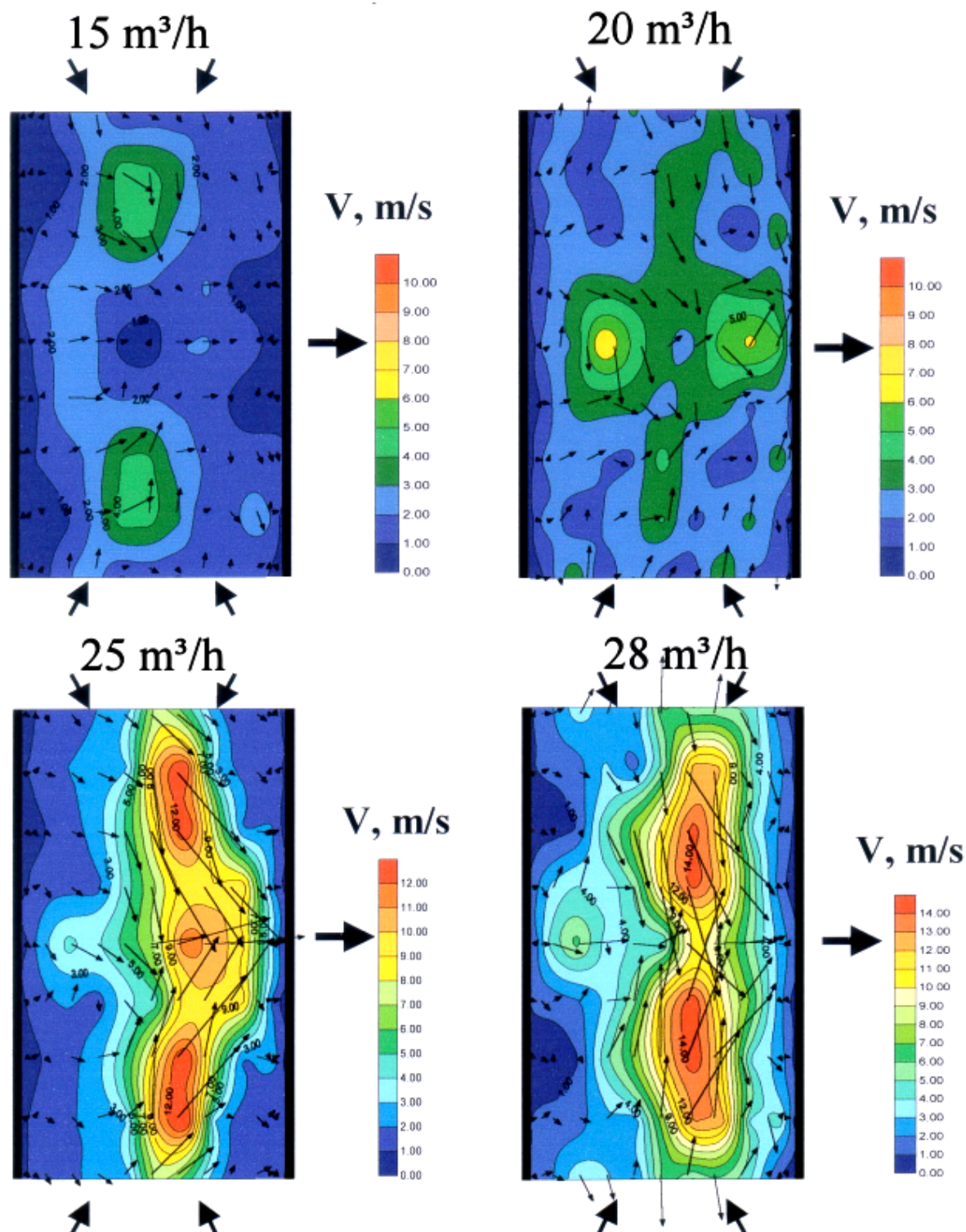
Es ergeben sich erwartungsgemäß kleinere Einlaufströmungen, wenn nur 15 m<sup>3</sup>/h Sekundärluft ins Modell eingeblasen wird. Deutlich sichtbar ist, dass sie die Mitte des Querschnittes nicht erreichen, sondern schnell vom kräftigen Hauptstrom in den Abgaskanal abtransportiert werden. Auf dem Bild kann man die Umkehr der Sekundärströmung deutlich erkennen.

Die präsentierten Bilder bestätigen die schon erläuterte Tendenz. Die Zunahme des Gichtwindvolumens verursacht eine deutliche Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit. Dabei dringt die Sekundärluft tiefer ins Modellinnere ein. Die Vektoren sind entsprechend der Strömungsrichtung nach unten geneigt. An der Stelle, wo sich die beiden Einlaufströmungen treffen, entsteht eine Verwirbelung, welche fast den ganzen Bereich gegenüber dem Austritt erfasst. Je höher der Gichtwindvolumenstrom ist, desto näher zueinander liegen die Geschwindigkeitsmaxima der beiden Einlaufströmungen. Diese Tendenz lässt sich in Bild 40 gut erkennen. Bei 20 m<sup>3</sup>/h befinden sich solche Bereiche der höchsten Geschwindigkeiten am Rand des gemessenen Querschnittes. Mit der Zunahme des Gichtwindvolumens verlagern sie sich in die Mitte des Modells. Bei 28 m<sup>3</sup>/h vereinigen sich die Einlaufströmungen. Dadurch entsteht ein Gebiet mit hohen Geschwindigkeiten, welches sich über den ganzen oberen Bereich des Querschnittes erstreckt.

Gegenüber dem Austritt, wo die Gasmischung schon in den Abgaskanal umgelenkt wurde, herrschen immer noch hohe Geschwindigkeiten. Aus dem Vektorbild kann im oberen Modellabschnitt aufgrund der starken Verwirbelung keine exakte Strömungsrichtung abgeleitet werden.

An Hand der dargestellten Bilder kann man schlussfolgern, dass es dem Gichtwind fast vollständig gelingt die Primärluft auf diesem Querschnitt aufzuhalten. Daraus resultiert eine effektive Abbremsung des Hauptstromes. Im Zusammenhang mit der 10°-Neigung wurden durch die Erhöhung der Gichtwindvolumina hervorragende Primär- und Sekundärluftverhältnisse erhalten. Die Verwirbelung erfasst nicht nur den oberen Bereich gegenüber dem Austritt sondern auch die Gebiete unter den Düsen. Sie erstreckt sich über die ganze Modellmitte. Das ist auf jeden Fall von großer Bedeutung für den Originalofen, da die Ansatzbildung dadurch deutlich verringert werden kann.

Aus den dargestellten horizontalen Strömungsprofilen ( s. Bild 41 ) ist der Verlauf der Sekundärluftströmung auf dem Niveau unter den Düsen anschaulich präsentiert. Die Geschwindigkeit wächst nahezu proportional mit den Gichtgasvolumina. Diese Abhängigkeit ist sehr deutlich. Es ergibt sich ein Anstieg der maximalen Geschwindigkeit im



**Bild 41:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina; Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen; ( s. a. Anhang Seite 170, 171 )

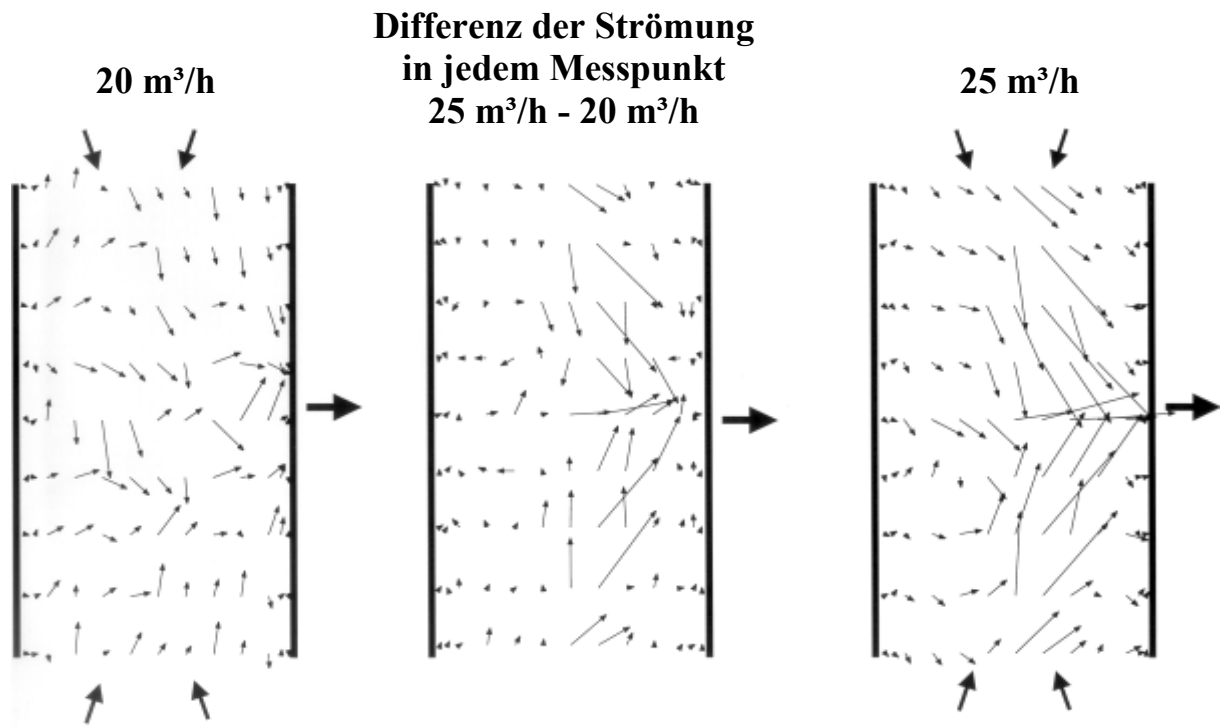
Querschnitt. Die Einlaufströmungen wirken stärker auf diesem Niveau auf den aufsteigenden Hauptstrom ein. Durch die Erhöhung des Gichtwindvolumenstroms wird die Sekundärluft erwartungsgemäß deutlich beschleunigt. Bei  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  liegt ihre Geschwindigkeit über  $12 \text{ m/s}$ . Bei  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  wird diese Tendenz noch deutlicher. Dabei wurde im Kern der Einlaufströmung eine Geschwindigkeit von ca.  $14 \text{ m/s}$  gemessen. Der strömungsreiche Bereich nimmt fast den ganzen Querschnitt ein. Im Vergleich zu den anderen Profilen tritt hier die höchste Geschwindigkeit auf. Auf Grund der geneigten Gichtwindzuführung wird die Primärluft stärker abgebremst. Dieser Vorgang wird durch die Ausdehnung der Einlaufströmungen zusätzlich begünstigt. Es kommt infolge der sich stark ausbildenden Einlaufströmungen zu einer effektiveren Quervermischung auf dem Niveau unter den Düsen. Aufgrund der effektiveren Abbremsung lenkt die Primärluft nicht gleich in den Austritt um. Man kann auch eine Reduzierung der strömungsarmen Gebiete feststellen bzw. die Totzone an der Wand unter der Austrittskante wird deutlich schmaler. Dieser positive Einfluss nimmt mit der Zunahme der Gichtwindvolumina zu. Es ist jedoch nicht gelungen, den Bereich durch die Sekundärströmung vollständig zu erfassen und abzubilden.

Eine Abnahme des Gichtgasvolumens auf  $15 \text{ m}^3/\text{h}$  führt zur Verringerung der Geschwindigkeit der beiden Einlaufströmungen. So ergibt sich ein maximaler Wert von nur noch  $5 \text{ m/s}$ , welcher im Vergleich zu den anderen Einstellungen deutlich kleiner ist. Wie aus dem Profil gut zu erkennen ist, wird die Primärluft bei diesem Volumen durch die Sekundärluft auf diesem Niveau nur geringfügig beeinflusst. Damit kann diese Einstellung der Gichtwindzuführung nur eine geringe Änderung der Strömung bewirken.

Wie man aus dem Bild 42 entnehmen kann, ergibt die Differenz der horizontalen Vektorprofile, die bei verschiedenen Gichtgasvolumina auf einem Niveau unter den Düsen aufgenommen wurden, deutliche Unterschiede.

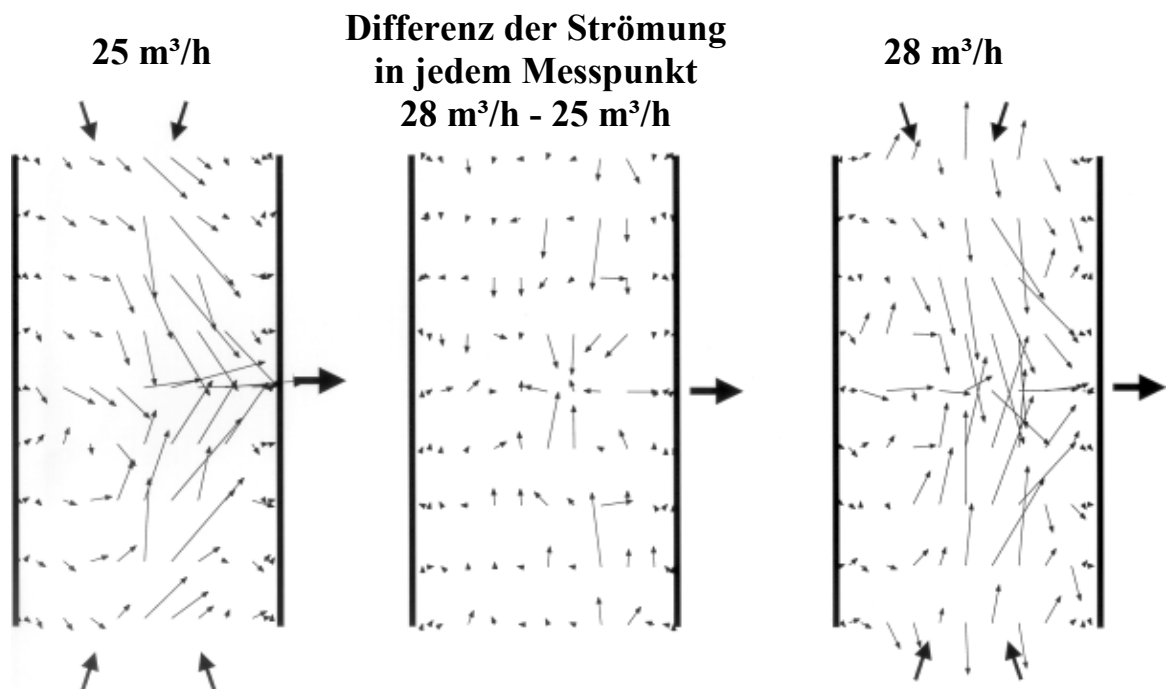
Man kann den Verlauf der Sekundärluft deutlich erkennen. Die Länge der Pfeile nimmt mit der Erhöhung des Gichtwindvolumens markant zu. Besonders trifft das auf die Mitte der beiden Einlaufströmungen zu. Die Veränderungen in der Nähe des Austrittes müssen ebenfalls beachtet werden. Aufgrund der Erhöhung der Geschwindigkeit ergeben sich längere Vektoren, die an dieser Stelle an die Wand gerichtet sind. Daraus kann man einen positiven Trend erkennen, welcher zum Abbau der Totzone an dieser Stelle führen könnte.

Zur weiteren Veranschaulichung ist noch ein Differenzbild ( s. Bild 43 ) präsentiert. Dabei sind die Unterschiede zwischen den Strömungsvorgängen, die bei einem Gichtwindvolumen von  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  erhalten wurden.



**Bild 42:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben

Es ist gut zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsverteilung in beiden Fällen ähnlich ist. Das beweisen die kleinen Differenzvektoren an den Rändern des Schnittes. Die Unterschiede ergeben sich hauptsächlich im Kern der Einlaufströmungen.

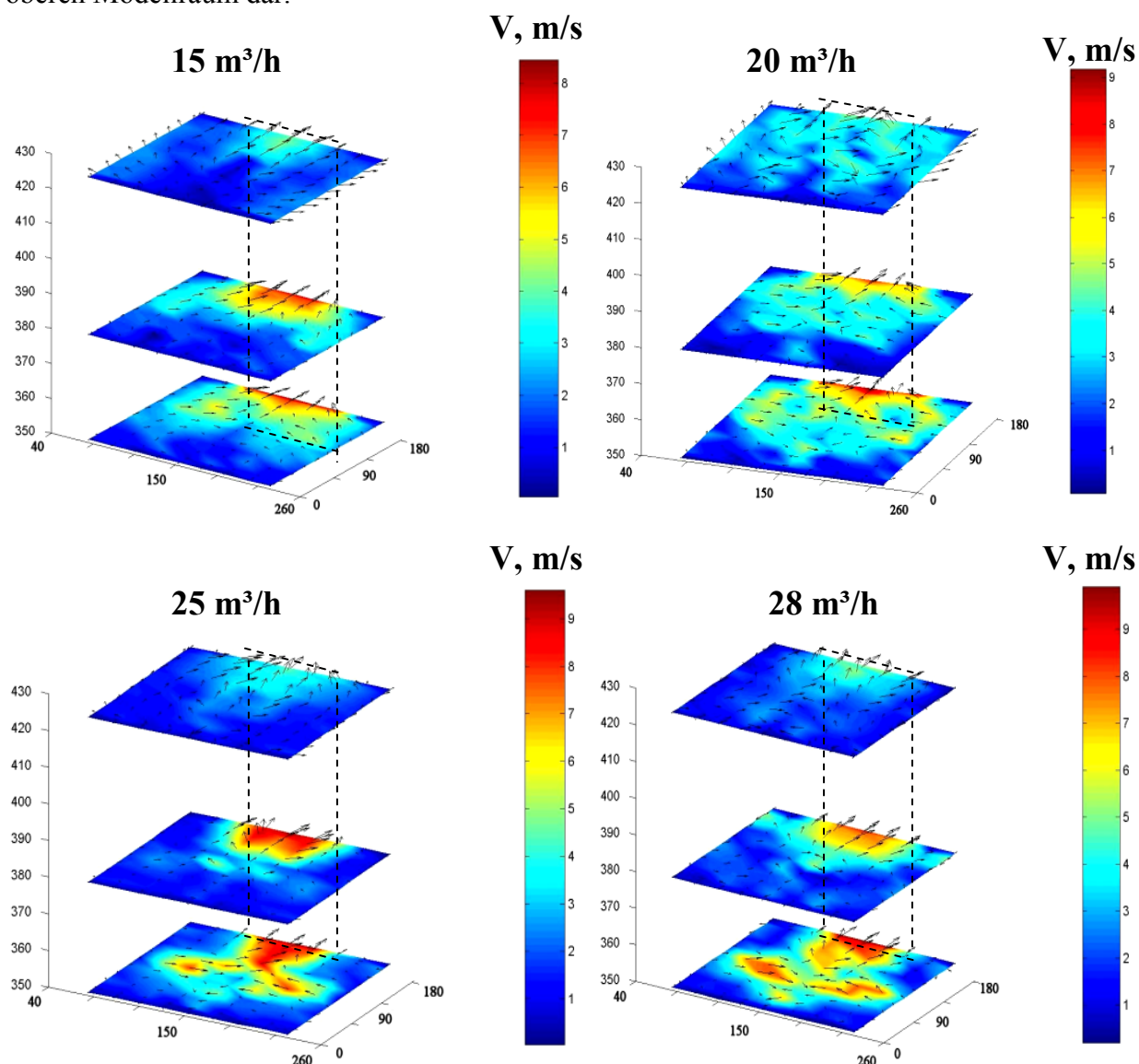


**Bild 43:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben



Das mittlere Bild zeigt, dass die Strömungsrichtung dabei unverändert bleibt, aber der Gichtwind mit der Erhöhung des Gichtwindvolumens um  $3 \text{ m}^3/\text{h}$  deutlich beschleunigt wird. Daraus resultieren die langen Vektoren in der Mitte der Differenzdarstellung. In den anderen Bereichen sind die Unterschiede nicht so markant. Sie entsprechen der allgemeinen Tendenz, dass die Geschwindigkeit mit der Erhöhung der Gichtwindvolumina zunimmt.

Bild 44 zeigt die horizontalen Strömungsprofile beim Einblasen von Sekundärluft im oberen Modellabschnitt bei variierten Gichtgasvolumina. Die entlang der x- und y-Achse auf verschiedenen Höhen ermittelten Geschwindigkeiten sind daraus ersichtlich. Mit einer unterbrochenen Linie ist der Austritt skizziert. Drei Profile befinden sich im oberen Teil des Modells gegenüber dem Austritt. Zusammen stellen sie deutlich den Verlauf der Strömung im oberen Modellraum dar.

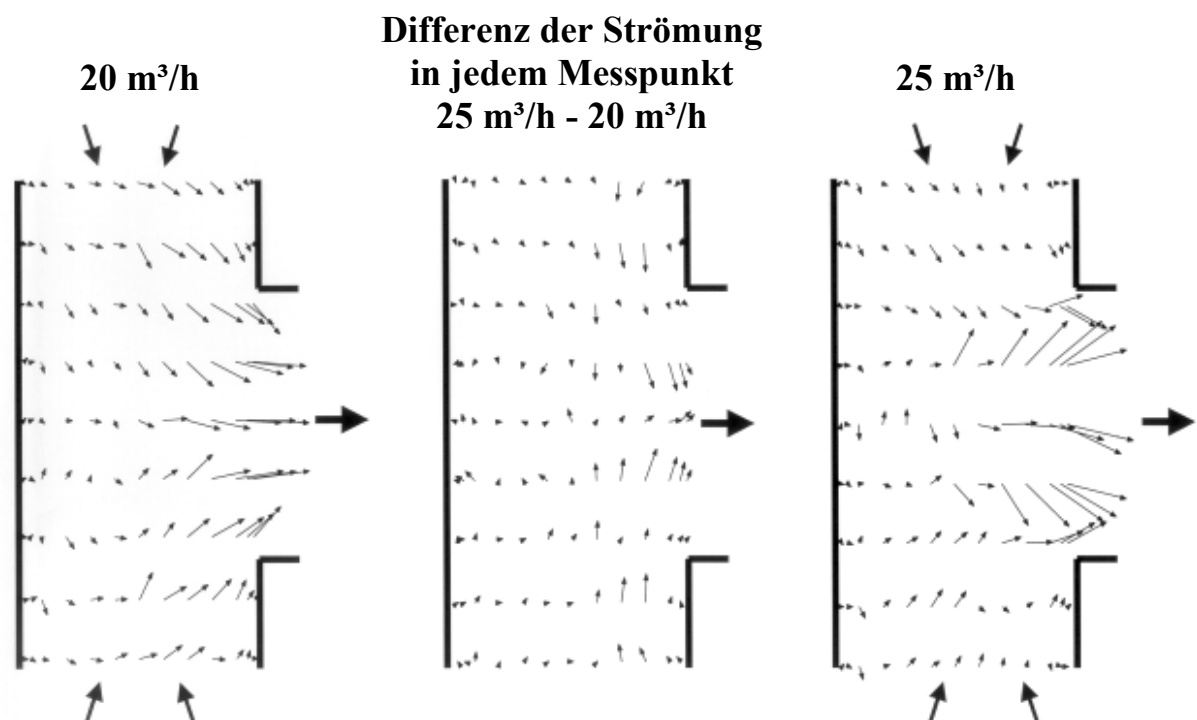


**Bild 44:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina ( s. a. Anhang Seite 164, 172, 173, 174 )

Auf Grund der Mächtigkeit und der Neigung der Einlaufströmungen kann man ihre oberen Teile auf dem unteren Schnitt noch erkennen. Sie treffen sich auf diesem Niveau in der Modellmitte. Danach werden sie vom Hauptstrom in den Abgaskanal abtransportiert. Die Geschwindigkeitsvektoren zeigen deutlich die Umkehr des Gichtwindes. Je höher das Volumen der Sekundärluft, ist desto breiter sind die oberen Konturen der Einlaufströmungen. Ansonsten ist das Strömungsmuster dem Bild, das beim Volumen der Sekundärluft von 20 m<sup>3</sup>/h aufgenommen wurde, recht ähnlich. Am Austritt ist lediglich ein Gebiet maximaler Geschwindigkeit vorhanden. Das betrifft die beiden Profile, welche bei den erhöhten Gichtgasvolumina gemessen wurden. Die Gasströmung konzentriert sich im Austrittsbereich. Hier wurde wie bei den anderen Profilen eine Geschwindigkeit von ca. 10 m/s, als auch eine identische Strömungsverteilung erhalten.

Durch die Erhöhung des Gichtwindvolumens erzielt man eine effektivere Umströmung des ganzen oberen Modellraumes. Diese Aussage betrifft hauptsächlich die untere Kante des Austrittes. Daraus ist eine erhebliche Abnahme der Ansatzbildung an dieser Stelle zu erwarten. An den Wänden gegenüber dem Austritt sind immer noch strömungsarme Bereiche vorhanden ( kleine Ansätze ), welche jedoch vernachlässigbar sind.

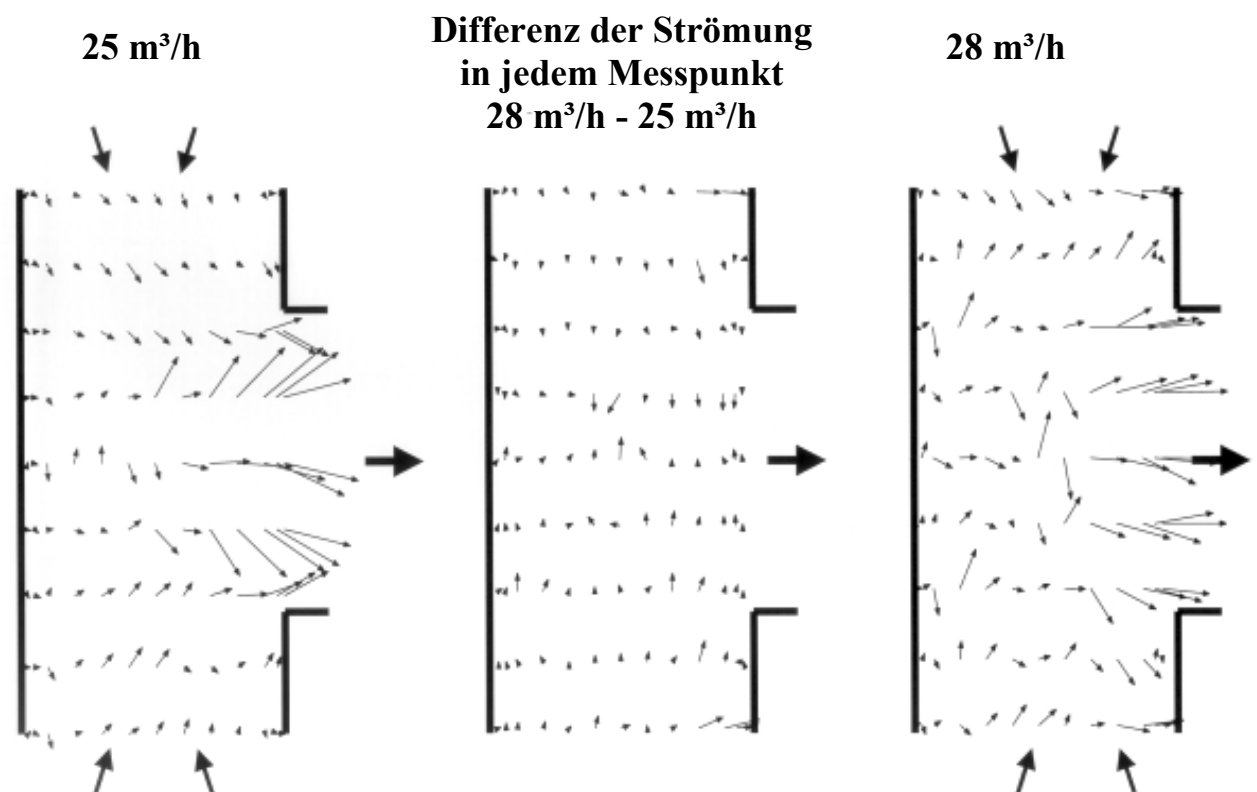
Die präsentierten Bilder ( s. Bild 45 ) zeigen die Differenz der Strömungsprofile, welche auf einem Niveau in der Mitte des Austrittes aufgenommen wurden.



**Bild 45:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben

Aus der Vektordarstellung geht deutlich hervor, dass in diesem Querschnitt geringfügige Unterschiede auftreten. In beiden Fällen blieb die Strömungsrichtung unabhängig vom Gichtgasvolumen erhalten. Es ergibt sich eine ähnliche Geschwindigkeitsverteilung. Das Differenzbild bestätigt die schon erläuterte Tendenz, dass man beim Vergleich der beiden Strömungsprofile die längeren Vektoren bekommt, wenn mehr Sekundärluft eingeblasen wird.

Bild 46 zeigt die Vektorbilder, die bei verschiedenen Gichtwindvolumina (  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  ) aufgenommen wurde. Weil sich der Gichtwind mit der Primärluft auf einem Niveau unter den Düsen trifft, sind die Unterschiede der beiden Profile gering. In diesem Schnitt ergeben sich kleinere Differenzvektoren. Man kann feststellen, dass die Strömungsrichtung ebenfalls erhalten blieb. Unterschiede treten nur am Austritt auf, wo sich die Strömung hauptsächlich in der Mitte des Abgaskanals konzentriert. Aus dem Differenzbild geht deutlich hervor, dass die Verschiebung der Gasströmung an dieser Stelle geringfügig ist.



**Bild 46:** Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben

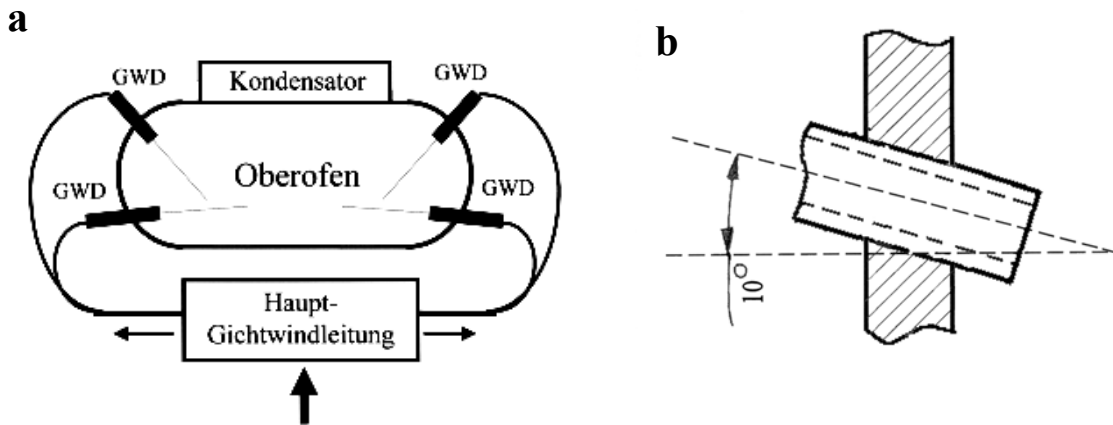


Aus den dargestellten Profilen können folgende Aussagen hinsichtlich der Effektivität der erhöhten Gichtgasvolumina auf die Strömungsvorgänge im Ofenmodell getroffen werden:

- Es wurde eine effektivere Geschwindigkeitsverteilung hinsichtlich der Ansatzbildung im Modell erreicht. Durch die Erhöhung des Volumens des Gichtwindes, der über die geneigten Düsen eingeblasen wird, gelingt es, die Primärluft effektiver abzubremesen. Dadurch kann die Nachverbrennung des Kohlenmonoxides und des mechanisch mitgerissenen Staubes positiv beeinflusst werden. Das alles zusammen kann zur Reduzierung der Ansatzbildung im Originalofen führen.
- Ein anderer positiver Einfluss ist die Form der Umströmung der unteren Kante des Austrittes. Aufgrund der Art und Weise der Gichtwindzuführung gelingt es, die Totzone an dieser Stelle abzubauen. Durch das schräge Einblasen der erhöhten Mengen der Sekundärluft wurde die Strömungsrichtung auf dem Niveau unter den Düsen geändert. Sie läuft nicht parallel sondern fast senkrecht zur Wand ab. Als Ergebnis verringert sich die Ansatzbildung an der unteren Kante des Austrittes.
- Während der Variation der Gichtwindzuführung gelang es leider nicht, den strömungsarmen Bereich an den Wänden vollständig abzubauen. Daraus kann man schlussfolgern, dass die Ansatzbildung im Originalofen nicht vollständig auszuschließen ist, jedoch deutlich geringer werden dürfte.
- Die gemachten Aussagen bezüglich der Unterschiede zwischen den Geschwindigkeitsfeldern betreffen nicht die thermodynamischen Aspekte bzw. die Zunahme der Wärmemenge, die durch die Erhöhung der CO-Nachverbrennung im Oberofen entstehen kann. Letztere kann die Vorgänge im Ofen zusätzlich beeinflussen.

#### 6.3.4. Strömungsergebnisse bei kombinierten Einstellungen der Gichtwinddüsen

Anschließend wurde eine andere Gichtwindzuführung untersucht. Dabei variierte man die Art und die Menge der aus den Düsen herausströmenden Sekundärluft. Bei dieser Einstellung wurde der Gichtwind unter einem Neigungswinkel von  $10^\circ$  ins Modell eingeblasen.

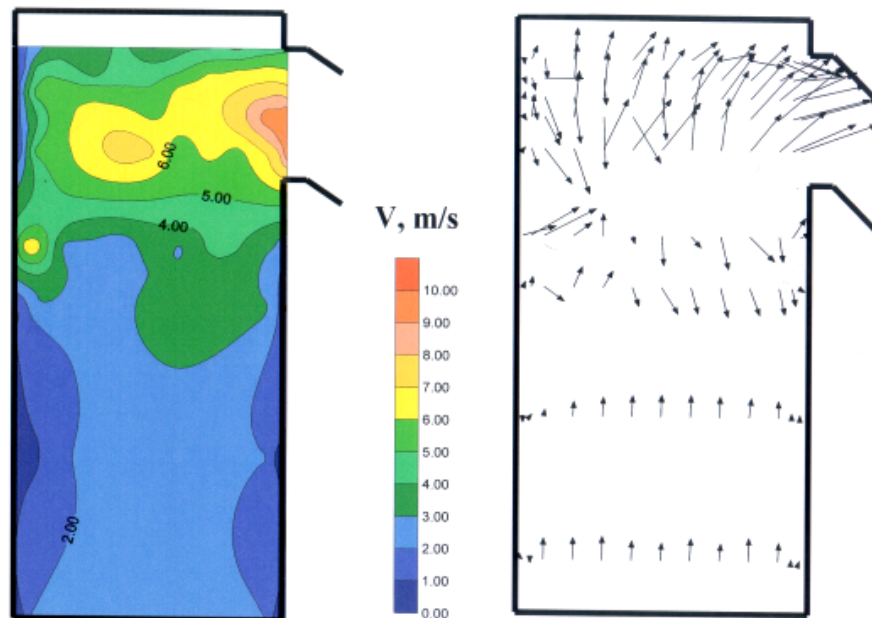


**Bild 47a und b:** Kombinierte Einstellung der Gichtwinddüsen; a – Draufsicht, b – Seitenansicht

Das Sekundärluftvolumen betrug bei den Messungen  $25 \text{ m}^3/\text{h}$ . Durch diese Anordnung der Düsen strömt der Gichtwind in Richtung der Vorderwand des Modells. Dadurch kann man einen längeren Strömungsweg der Sekundärluft erreichen und gleichzeitig die damit verbundene Verweilzeit erhöhen. Zusätzlich soll der erhöhte Gichtwindvolumenstrom die Verwirbelung im oberen Modellteil begünstigen. Als Ergebnis wird die CO-Nachverbrennung verbessert. Daraus resultierend, ist eine Abnahme der Ansatzbildung im Ofen zu erwarten. Diese kombinierte Einstellung der Gichtwinddüsen ist auf dem Bild 47 zu sehen.

Die Geschwindigkeitsverhältnisse im Vertikalschnitt zeigt Bild 48. Diese Abbildung mit den dargestellten Geschwindigkeitsprofilen bezieht sich auf den Schnitt des Modells, der senkrecht zum Austritt liegt. Vom besonderen Interesse war die Geschwindigkeitsverteilung im oberen Bereich des Modells. In diesem Abschnitt ergibt sich erwartungsgemäß ein längerer Strömungsweg. Hier tritt eine Verschiebung der höchsten Geschwindigkeiten, die nach oben zur Modeldecke gerichtet ist, auf. Die Geschwindigkeitsvektoren an der Vorderwand des Modells zeigen den Verlauf der Sekundärluft nach dem Zusammentreffen der beiden Einlaufströmungen. Bei dieser Anordnung der Düsen findet hier eine Umlenkung des Gichtwindes statt. Die Sekundärluft geht nach oben, beschreibt einen Bogen und strömt danach in den Übergang. Daraus ergibt sich eine nach oben verschobene Form des Feldes der höchsten Geschwindigkeiten, welches in der Mitte des Austrittsbereiches gemessen wurde.

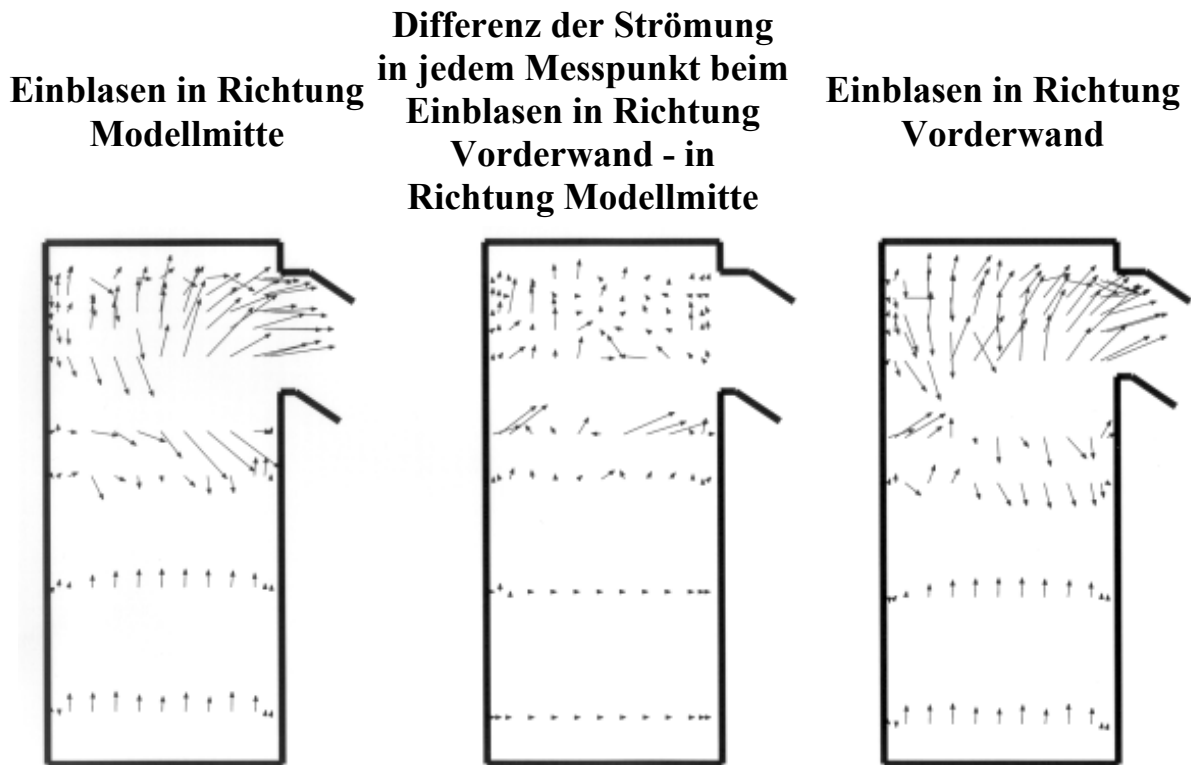
Diese charakteristische Erscheinung wurde nur bei dieser GichtwinddüsenEinstellung festgestellt. Beim Vergleich der Varianten der Gichtwinddüsenanordnung treffen die Aussagen zu, dass die höchste Verweilzeit der Sekundärluft im Modell infolge der Strömungsumlenkung entsteht. Dementsprechend günstig sollte die CO-Nachverbrennung in Oberofen sein.



**Bild 48:** Strömungsbild beim Einblasen von Sekundärluft bei der kombinierten DüsenEinstellung senkrecht zum Austritt; ( s. a. Anhang Seite 175 )

Um die durch die neue Einstellung hervorgerufenen Unterschiede besser zu begreifen, ist ein Differenzbild ( s. Bild 49 ) präsentiert. Das bei der kombinierten Position der Düsen gemessene Profil wurde mit der Vektordarstellung verglichen, welche bei ähnlichen Parametern der Gichtwindzuführung ( Neigung  $10^\circ$ , Gichtwindvolumen  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  ) aufgenommen wurde. Nur die Einblasrichtung unterscheidet die beiden Profile.

Wie schon oben erläutert wurde, beschreibt die Sekundärluft im oberen Bereich des Modells einen Bogen, wenn sie in Richtung der Vorderwand eingeblasen wird. Auf dem Differenzbild sind die Vektoren zu sehen, die diesem Verlauf der Gasströmung entsprechen. An der Vorderwand des Modells, wo sich die beiden Einlaufströmungen treffen, ergeben sich längere Pfeile, die an die Decke gerichtet sind. Manche Vektoren in der Mitte des Schnittes liegen fast waagerecht. Dadurch dokumentieren sie eine Verschiebung der Strömung zur Vorderwand, wenn die Sekundärluft in ihrer Richtung eingeblasen wird. Auf dem Niveau über den Düsen kann man den weiten Verlauf der Luft gut erkennen. Die Differenzvektoren liegen hauptsächlich senkrecht.

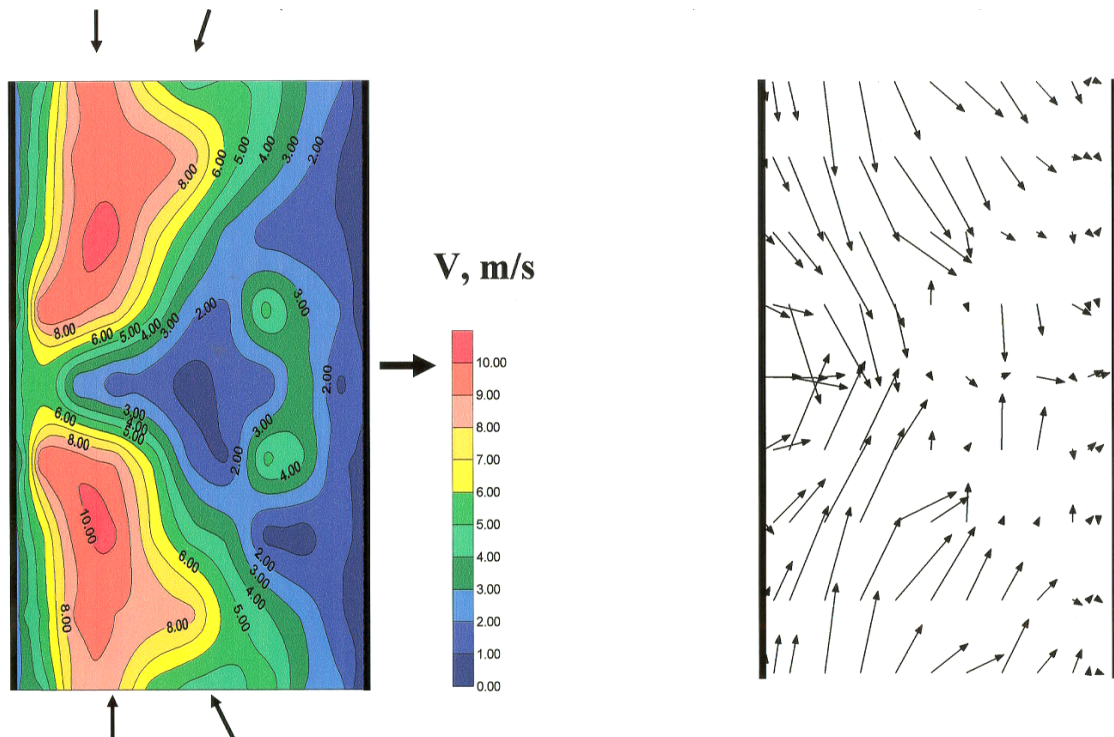


**Bild 49:** Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Position der Düsen

Geringfügige Unterschiede können auch am Austritt festgestellt werden. Die Sekundärluft tritt in den Abgaskanal waagrecht ein. Aus diesem Grund sind hier die kleinsten Differenzvektoren zu sehen, die nach oben gerichtet sind. Hier sind die Unterschiede nicht gravierend.

Bild 50 zeigt das horizontale Strömungsprofil eines Schnittes unter den Gichtwinddüsen. Durch veränderte Primär- und Sekundärluftverhältnisse unterscheiden sich die Strömungsvorgänge bei der kombinierten Düseneinstellung im ganzen Modell sichtbar von den bei anderen Anordnungen ermittelten Daten.

Diese Art der Gichtwindzuführung führt zu einer völlig anderen Form der Geschwindigkeitsverteilung im Modellraum. Der Gichtwind wird hier in Richtung der Vorderwand transportiert. Dort treffen die Einlaufströmungen zusammen, vermischen sich und strömen unter dem Einfluss der aufsteigenden Primärluft nach oben. Das Vektorbild zeigt, dass die untere Kante des Austrittes in diesem Fall strömungsarm bleibt, so dass die Totzoneentwicklung an dieser Stelle nicht wesentlich verhindert wird. Die entstehenden Einlaufströmungen begünstigen ihre Zunahme an der unteren Kante des Austrittskanals. Die mittlere Geschwindigkeit entlang Achse x und y liegt in diesem Bereich unter 2 m/s. Es lässt sich aus dem Strömungsprofil gut erkennen, dass auf dieser Modellhöhe eine schlechte Verwirbelung auftritt.

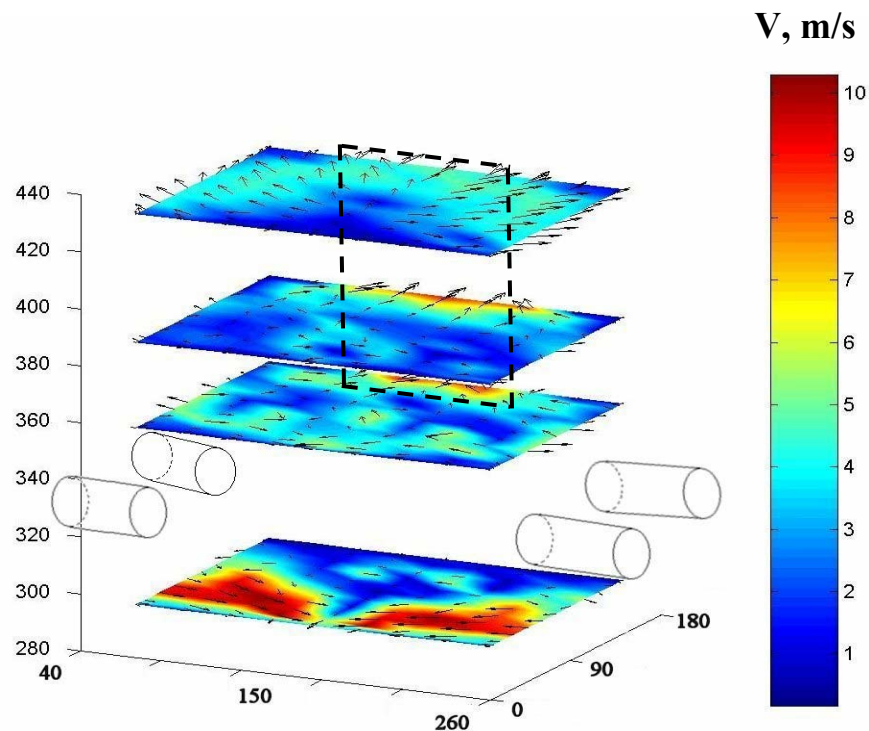


**Bild 50:** Strömungsbild beim Einblasen von Sekundärluft bei der kombinierten Düseneinstellung, Sicht von oben, Schnitt unter den Gichtwinddüsen; ( s. a. Anhang Seite 176 )

Auf Grund der Einstellung der Düsen ergibt sich eine niedrige Abbremsung der Primärluft. Sie strömt störungsfrei aus dem Ofenschacht direkt in den Übergangskanal. Die aus dem Schacht austretenden „kalten“ Ofengase ( 800-850 °C ) werden vom Gichtwind nur zum Teil abgebremst. Auf Grund der fehlenden Verwirblung werden sie nicht vollständig auf die in der oberen Ofensektion herrschende Temperatur von über 1000 °C erhitzt. Die Ofengase strömen über die untere Kante des Austrittes direkt in den Übergangsbereich. Dadurch erfolgt eine zusätzliche Abkühlung dieses Abschnittes. Dies kann zur stärkeren Ansatzbildung an dieser Stelle führen.

Bild 51 zeigt das gesamte horizontale Strömungsprofil im oberen Modellraum. Die auf verschiedenen Höhen ermittelten Geschwindigkeiten entlang der Achse x und y sind darauf zu sehen. Die zugehörigen Darstellungen der Geschwindigkeitsvektoren sind auf allen gemessenen Schnitten dargestellt. Mit einer unterbrochenen Linie ist der Austritt skizziert.

Die gezeichneten Düsen sollen einen Einblick auf ihre Position bezüglich der Höhe geben. Drei Profile befinden sich im oberen Teil des Modells gegenüber dem Austritt. Ein Strömungsprofil wurde unter den Gichtwinddüsen gemessen. Zusammen stellen sie den Verlauf der Strömung im oberen Modellraum deutlich dar.



**Bild 51:** Drei horizontalen Strömungsprofile bei der kombinierten Düseneinstellung ( s. a. Anhang Seite 177 )

Im weiteren Verlauf der Strömung von unten nach oben konzentrieren sich die höchsten Gasgeschwindigkeiten auf den austrittsnahen liegenden Bereich. Dies lässt sich folgendermaßen erklären. Die aus dem Ofen austretenden Gase werden teilweise vom Gichtwind abgebremst und strömen direkt über die untere Kante des Austrittes in den Übergangsbereich. Die Form des Feldes der hohen Geschwindigkeiten stimmt mit den bei den anderen Düsenanordnungen aufgenommenen Profilen überein.

In Abhängigkeit von den geometrischen Gegebenheiten und den Strömungsgeschwindigkeiten kann man noch die Spuren der Einlaufströmungen auf dem Niveau über den Gichtwinddüsen deutlich zu erkennen. Dadurch herrscht eine starke Verwirbelung an der Vorderwand, die fast den ganzen Modellraum umfasst. Die Primärluft reißt den Gichtwind hauptsächlich in der Austrittsmitte in den Übergangsbereich mit. Aus den Bildern geht deutlich hervor, dass die wandnahen Bereiche bei dieser Einstellung der Gichtwinddüsen mit zunehmender Höhe im Vergleich zu anderen gemessenen Profilen erwartungsgemäß nicht strömungsärmer werden.

Die gemessenen Strömungsprofile lassen die Schlussfolgerung zu:

- Es ergibt sich ein größerer Strömungsweg der Sekundärluft und damit eine deutlich längere Verweilzeit im Oberofen.

- Das gesamte Primär- und Sekundärluftverhältnis wird bei dieser Einstellung der Gichtwinddüsen beeinträchtigt. Das Ziel, eine effektivere Verteilung durch Einblasen des Gichtwindes zu erreichen, wird in diesem Fall verfehlt.
- Im Gegensatz zu den anderen Gichtwinddüsenanordnungen breitete sich im Vergleich zu den Einstellungen die Totzone an der unteren Kante des Austrittes aus. Daraus resultieren an dieser Stelle Bedingungen, unter denen die Ansätze wachsen können.
- Im Zusammenspiel der Hauptströmung und des Gichtwindes entstehen bezüglich der Ansatzbildung ungünstige Strömungsverhältnisse. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen deutlich die uneffektive Wirkung der zur Zeit bei MHD angewandten Gichtwinddüseneinstellung.

An Hand der im Modell erhaltenen Strömungsprofile kann man hauptsächlich die Faktoren, wie Geschwindigkeit der Gasphase sowie ihre Verteilung im Modellraum berücksichtigen, die einen Einfluss auf die Ansatzbildung ausüben. Um die chemischen Reaktionen, die für die Bildung der Ansätze im Ofen verantwortlich sind, zu beschreiben, ist eine thermodynamische Modellierung am Rechner erforderlich. Dabei können die Bedingungen erläutert werden, unter welchen die Ansatzbildung möglich ist.

## 7. ChemSage-Modellierung

### 7.1. Modellbeschreibung

Zur Charakterisierung der Ansatzbildung werden thermodynamische Berechnungen angestellt, welche das Ziel haben, einen Zusammenhang zwischen dem Wachstum der Ansätze und der Temperatur sowie der Zusammensetzung der Abgase im Oberofen der IS-Anlage festzustellen. Dabei gibt es folgende Fragen zu beantworten:

- wie ändert sich die Zinkoxidmenge im System bei unterschiedlichen Temperaturen?
- unter welchen Bedingungen hört die Rückoxidation des Zinkes auf?
- welchen Beitrag leisten die anderen Komponenten der Gasphase zur Ansatzbildung?

Als Grundlage für die Modellierung dient das Computerprogramm „ChemSage“ V4.2. Für die Berechnungen wurde ein Datenfile mit der Bezeichnung 8039c08g angewendet, welches von der Firma GTT erstellt wurde. Die Tabelle 3 zeigt die Informationen zum eingesetzten Programmpaket.

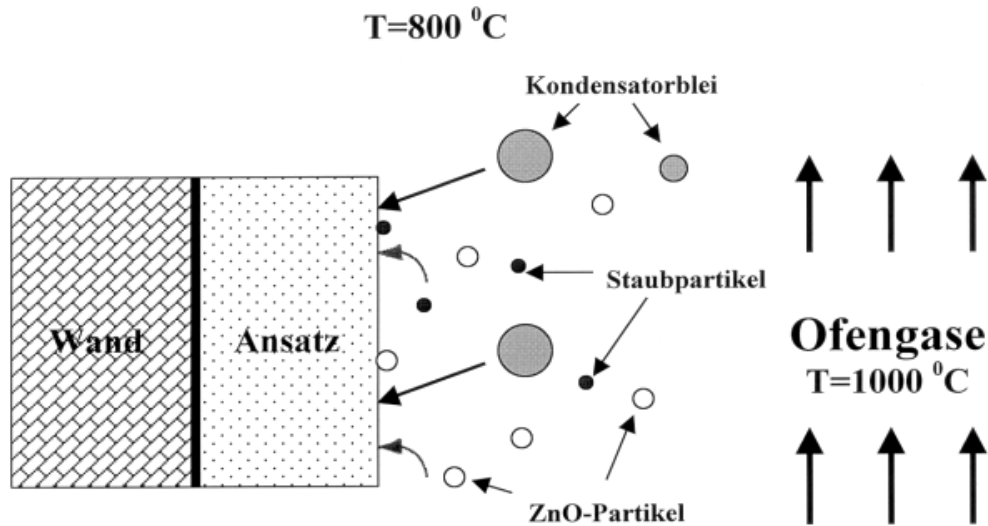
<b>Datenfile</b>	8039c08g
<b>ChemSage Version</b>	4.2 Extended
<b>Temperaturen</b>	max. 3000 K
<b>Zusammensetzung</b>	Reine Substanzen
<b>Referenzen</b>	/96SUV/ SGTE Pure Substances Data, University Version, 1996. /96SPS/ SGTE Pure Substances, Edition 1996, Version 2.

**Tabelle 3:** Angaben zum Programmpaket [ 78 ]

Das in diesem Datenfile verwendete Gesamtsystem besteht aus den 24 Systemkomponenten Zn, Pb, Cu, Sn, Sb, S, C, Fe, Mn, Ca, Mg, Al, Si, O, N, Na, K, P, Cl, F, H, Hg, Ca und As, sowie einigen hundert Spezies dieser Elementes. Das Datenfile 8039c08g berücksichtigt reine Substanzen und Verbindungen, die entweder kondensiert oder gasförmig als ideale Mischphase vorliegen.

Stellt man sich vor, dass an den Ofenwänden eine deutlich niedrige Temperatur als im Ofeninnenraum herrscht, dann kann Kondensation aus der Gasphase durch schrittweise Abkühlung des Gichtgases simuliert werden. Der Einfluss der Temperatur auf die Ansatzbildung soll durch ihre Variation überprüft werden. Dabei laufen mehrere chemische Reaktionen gleichzeitig ab, die sich gegenseitig überlagern. In der Tabelle 4 sind die chemischen Reaktionen aufgelistet, die im Temperaturbereich von 700-1100 °C für die Ansatzbildung bestimmend sind.





**Bild 52:** Schematische Darstellung der Ansatzbildung

Nr.	Reaktion	Beschreibung
(1)	$\text{Zn(g)} + \text{CO}_2\text{(g)} = \text{ZnO(s)} + \text{CO(g)}$	Die Rückoxidation des Zinkes durch $\text{CO}_2$
(2)	$\text{Zn(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} = \text{ZnO(s)} + \text{H}_2\text{(g)}$	Die Rückoxidation des Zinkes durch $\text{H}_2\text{O}$
(3)	$\text{CO(g)} + \frac{1}{2} \text{O}_2\text{(g)} = \text{CO}_2\text{(g)}$	Nachverbrennung des Kohlenmonoxides
(4)	$\text{PbO(s,l)} + \text{CO(g)} = \text{Pb(l)} + \text{CO}_2\text{(g)}$	Reduktion von Blei
(5)	$\text{Pb(l,g)} + \text{ZnS(s)} = \text{PbS(g)} + \text{Zn(g)}$	Reaktion zwischen Blei und ZnS

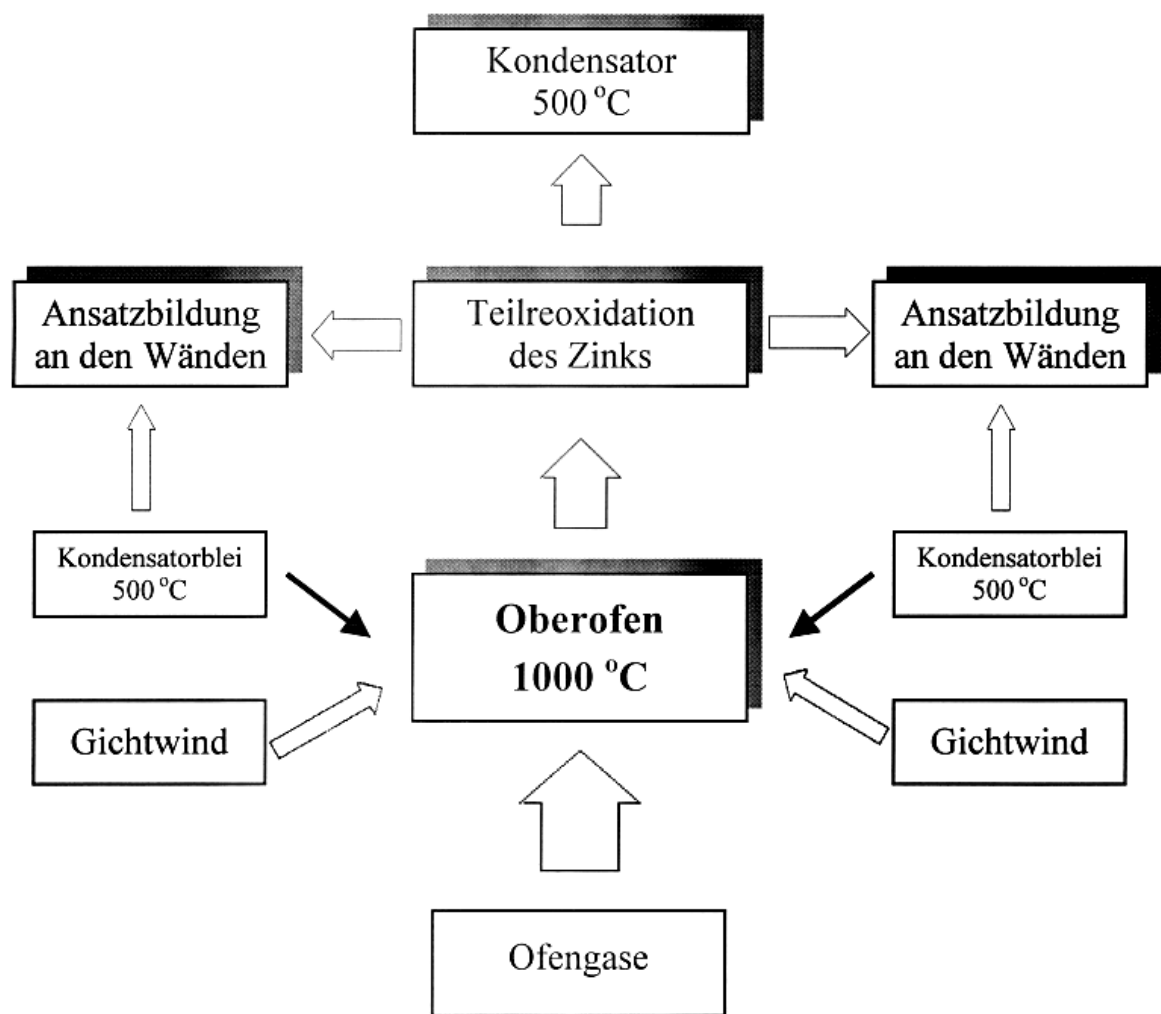
**Tabelle 4:** Die wichtigsten Reaktionen im Ofen [ 78 ]

Als Ergebnis der Rechnung kann man für eine beliebige Temperatur die Gleichgewichtszusammensetzung der Gasphase und der kondensierten Phase angeben. Für die thermodynamische Modellierung besteht das verwendete Stoffsystem aus den Komponenten Zn, Pb, C, O, S, N, und H. Der Gesamtdruck liegt bei 1,05 bar. Als Ausgangdaten für die nachfolgenden Berechnungen wurde die Zusammensetzung der Gasphase im IS-Ofen verwendet, die aus den Ergebnissen der durchgeführten thermodynamischen Modellierung [ 78 ] stammten. Die Werte wurden für diese Arbeit von MHD zur Verfügung gestellt. Tabelle 5 zeigt die für die Berechnung eingesetzten Daten.

Gasphase	mol/h	Vol.-%
$\text{N}_2$	1,53E+06	57,80
CO	6,26E+05	23,63
$\text{CO}_2$	2,63E+05	9,94
Zn	2,24E+05	8,48
Pb	4,05E+03	0,15
<b>Summe</b>	2,65E+06	100

**Tabelle 5:** Eingangsdaten für die Berechnung [ 78 ]

Für die untersuchte Problemstellung erscheint das angegebene Modell anwendbar ( s. Bild 53 ). In dem Modell wird davon ausgegangen, dass die mittlere Temperatur der Gasphase 1000 °C beträgt, was mit den Betriebsangaben übereinstimmt. Hinsichtlich der Ansatzbildung sind die Wandbereiche von besonderem Interesse. Nach den Literaturangaben [ 43, 77 ] ist die Temperatur am Mauerwerk deutlich niedriger als im Ofeninnern. Des weiteren gilt die Gasphase als Mischphase mit idealem Verhalten der Komponenten. Thermodynamische Betrachtungen gelten nur für den Gleichgewichtszustand und lassen kinetische Einflussfaktoren außer Acht. Die Aussagen aus thermodynamischen Daten sind deshalb für den laufenden technischen Prozess nur als Trendaussagen anzusehen.

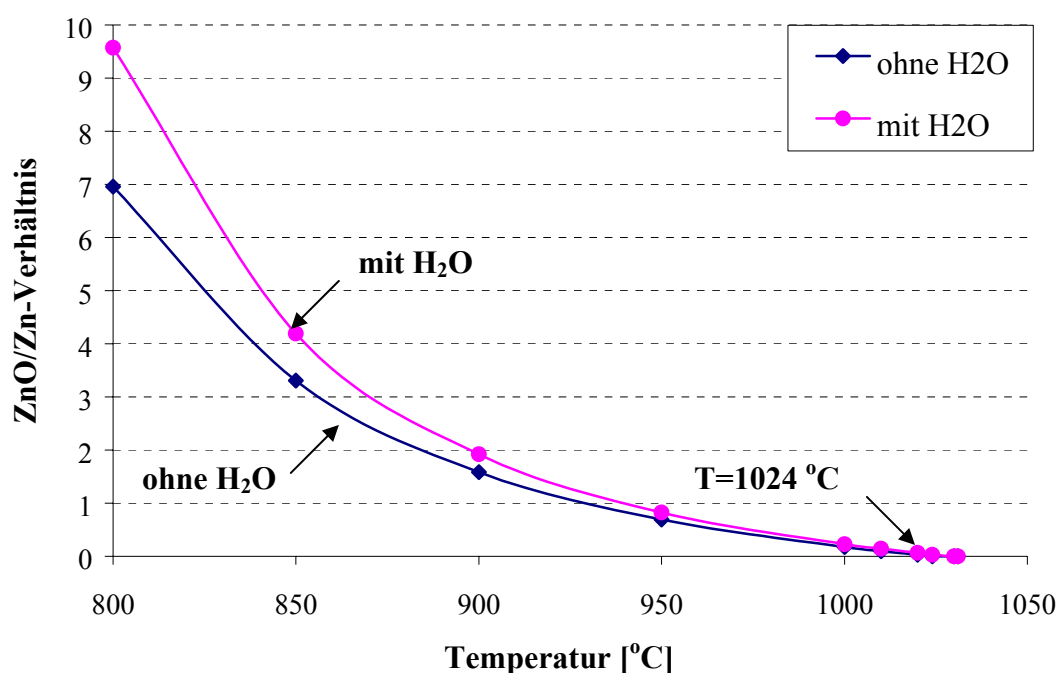


**Bild 53:** Modell der Entstehung der Ansätze im Oberofen der IS-Anlage

## 7.2. Ergebnisse der Berechnungen

Im ersten Schritt der Berechnung wurde die Abhängigkeit der Rückoxidation des Zinkes von der Temperatur durchgeführt. Im Bild 54 sind die Ergebnisse aufgetragen. Achse y entspricht dem Verhältnis zwischen reoxidiertem Zink in der kondensierten Phase und dem gasförmigen

Zink. Als Ergebnis der Rechnung kann man folgende Aussagen treffen: Die Abkühlung der Gasphase führt zu einer merklichen Rückoxidation und Kondensation des Zinkes als ZnO. Bereits bei einer Temperatur von 1000 °C oxidieren fast 10 % des Gesamtzinks im Gichtgas. Bei einer Abkühlung auf 800 °C liegt der Anteil des kondensierten Zinkes bei rund 85 %. Der Schnittpunkt der Kurve mit der Achse x gibt an, bei welcher Temperatur die Rückoxidation des Zinkes und somit die Ansatzbildung aufhört. Wie zu erkennen ist, liegt dieser Schnittpunkt bei einer Temperatur von 1024 °C. Das stimmt mit den Literaturangaben [ 29, 30, 31 ] überein. Aus diesem Grund soll die Temperatur im Oberofen leicht über diesem Wert liegen, um die Menge des reoxidierten Zinks zu minimieren.



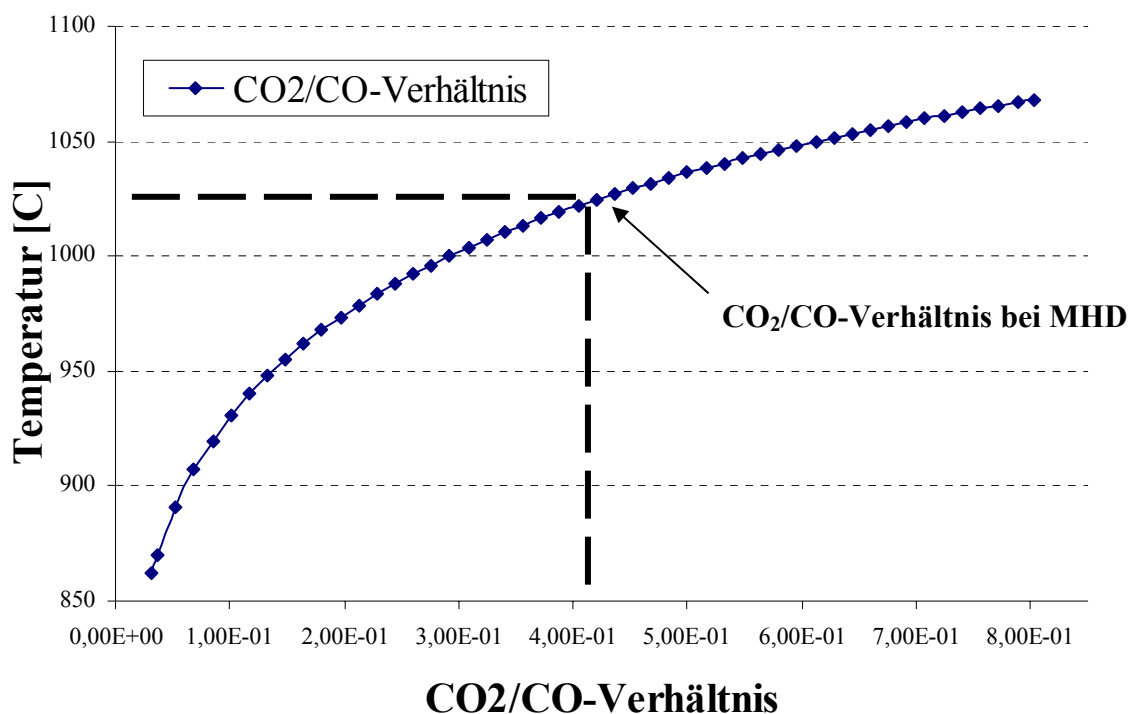
**Bild 54:** ZnO/Zn-Verhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur ohne sowie bei der Anwesenheit von Wasserdampf

Man hat zu beachten, dass die erste Kurve für Gichtgas ohne H<sub>2</sub>O berechnet wurde. Im Bild 54 ist auch das ZnO/Zn-Verhältnis bei einem Wasserdampfgehalt von 1 % des Gesamtvolumens in der Gasphase dargestellt. Es wird deutlich, dass beide Temperaturabhängigkeiten einen ähnlichen Verlauf zeigen, aber die Kurve mit H<sub>2</sub>O-Gehalt vergleichsweise höher liegt. Dies ist im vorliegenden Fall nachvollziehbar, weil mehr ZnO durch die Reaktion mit Wasserdampf im Ofen entstehen kann. So z.B. entstehen bei 1000 °C wird ca. 3 % mehr Zinkoxid im Gichtgas bei der Anwesenheit von Wasserdämpfen in den Abgasen. Die Temperatur, bei der die ersten Zinkoxidpartikel entstehen, wird zusätzlich um 5 °C nach oben verschoben.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die Verluste an rückoxidiertem Zink demzufolge insgesamt deutlich höher sind. Daraus ist zu schlussfolgern, dass Wasserdampf aus dem Gichtwind vor dem Einblasen zu entfernen ist. Sonst ist eine zusätzliche Beeinträchtigung des Prozesses zu erwarten.

Die gezeigten Kurven stellen den Ablauf der Rückoxidation des Zinks anschaulich dar. Wenn die Temperatur im Oberofen nur ca. 1000 °C beträgt, sind die ZnO-Partikel in der Gasphase vorhanden. In den wandnahen Bereichen, welche von der Strömung kaum erfasst werden ( s. Kapitel 6 ), können sich Teilchen am Mauerwerk niederschlagen und am Ansatzwachstum beteiligen. Man muss daher die Temperaturgrenze von 1024 °C im Oberofen überschreiten, damit keine Möglichkeit zur ZnO-Bildung besteht. Daher ist eine hohe Ansatzbildung bei den horizontalen und kombinierten Einstellung der Gichtwinddüsen ( s. Kapitel 6.3.1. und 6.3.4. ) zu erwarten. Als Ergebnis ist mit einer Zunahme der Ansatzbildung zu rechnen, weil die Zonen der schlechten Durchgasung vorhanden sind, wo niedrigere Temperaturen im Oberofen auftreten können. Als Folge wird mehr Zink zu Zinkoxid umgewandelt.

Die Temperatur des Gichtgases liegt im Oberofen bei 1000 °C, dabei wird schon ein Teil des Zinkes durch die Reaktion mit CO<sub>2</sub> reoxidiert und schlägt sich am Mauerwerk nieder. Daraus leitet sich die Frage ab, welche Maßnahmen zur Senkung der Zinkverluste führen können.



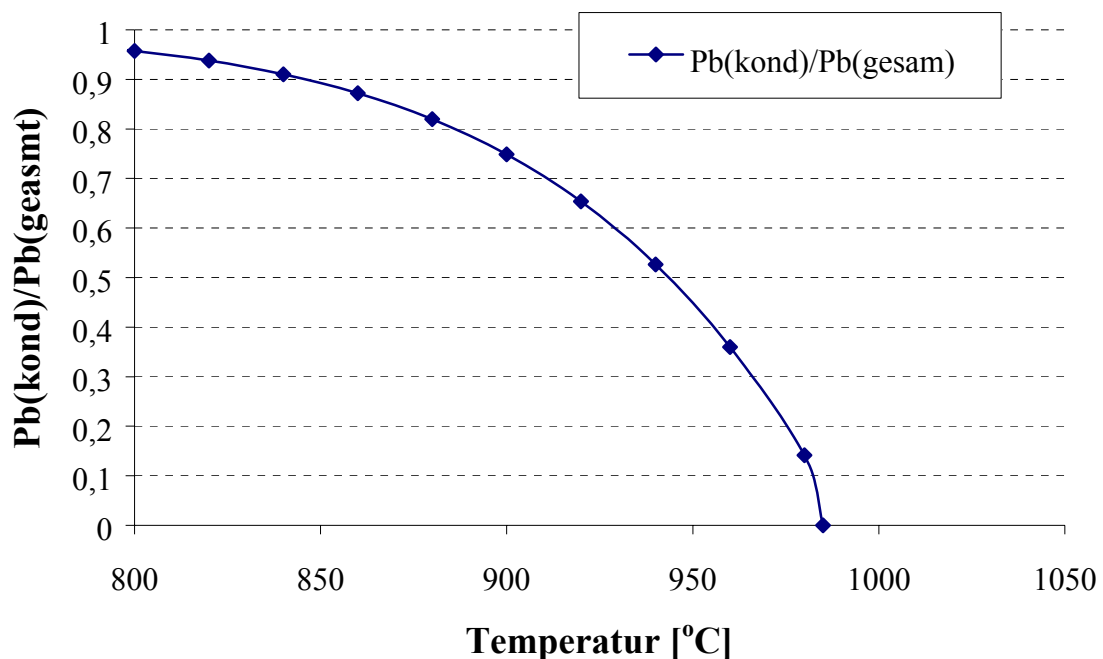
**Bild 55:** Abhängigkeit der ZnO-Bildungstemperatur vom CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis

Das im System einzustellende Verhältnis CO<sub>2</sub> zu CO beeinflusst die Temperatur, bei der die Zn-Rückoxidation beginnt. Deswegen wurde der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Berechnung variiert. Der

Gehalt an anderen Komponenten blieb unverändert. Im Bild 55 ist die Änderung der ZnO-Bildungstemperatur bei verschiedenen  $\text{CO}_2/\text{CO}$ -Verhältnissen aufgetragen.

Es ist gut zu erkennen, dass eine Verringerung der  $\text{CO}_2$ -Menge zur deutlichen Reduzierung der Temperatur führt, bei der die Zinkoxidbildung auftritt. Steigt das  $\text{CO}_2/\text{CO}$ -Verhältnis dem gegenüber, so liegt der Zinkgehalt in der Gasphase bei 1000 °C durch die Verluste mit ZnO niedriger.

Aufgrund des hohen Gehaltes an Blei in den Ansatzproben ist dieses Element nach dem ZnO für die Ansatzbildung von besonderem Interesse bei der Berechnung. Diese Komponente liegt im Gichtgas in Form eines Nebels vor. Bild 56 zeigt die Ergebnisse einer Simulation. Das Metall tritt in der kondensierten Phase bei einer Temperatur von 985 °C auf. Bei der weiteren Temperatursenkung setzt sich die Kondensation des Bleis aus den Abgasen fort. Wie aus den thermodynamischen Berechnungen hervorgeht, befinden sich bei 800 °C fast 95 % des Metalls in der kondensierten Phase. Dadurch kann sich Blei in den Ansätzen anreichern.



**Bild 56:** Verhalten von Blei bei der Temperatursenkung

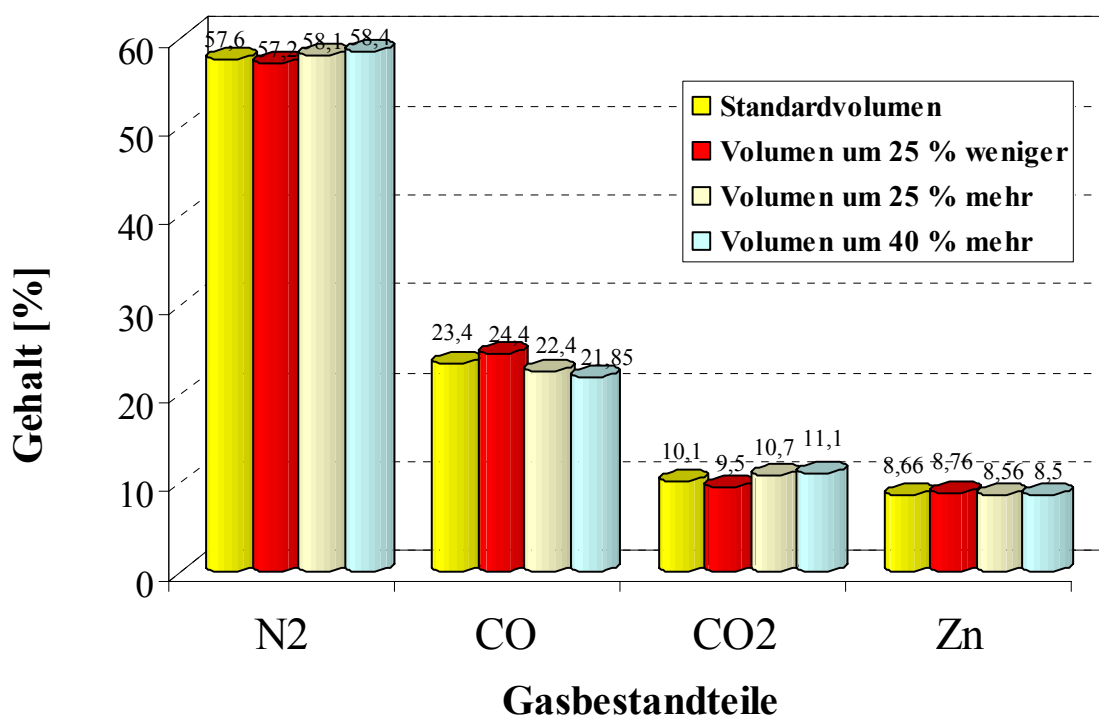
Blei kann sich an den Wänden durch die Reaktion mit den Bestandteilen der Beschickung abscheiden. Im Oberofen laufen mehrere Reaktionen, die zur Bleianreicherung führen können, ab. Auch durch eine Reaktion mit Schwefel kann Blei in die Ansätze gelangen. Aus diesem Grund wurde der Fall simuliert, wenn das Metall in den Abgasen in Form eines Sulfides oder Sulfates vorliegt. Die Berechnungen haben ähnliche Tendaussagen ergeben. In beiden Fällen reagiert Schwefel mit gasförmigem Zink, welches sich als ZnS am Mauerwerk

niederschlagen kann. Diese Umwandlung beginnt bei einer Temperatur von 1144 °C, Blei liegt dabei in der kondensierten Phase neben dem sulfidischen Zink metallisch vor.

Wie schon im Kapitel 6.3.3. beschrieben wurde, erzielt man effektivere Strömungsverhältnisse im oberen Teil des Modells durch eine Erhöhung des Gichtwindvolumens. Dadurch gelingt es, die Primärluft fast vollständig abzubremesen und eine gute Verwirbelung der beiden Gasströme zu erreichen.

Um den möglichen Einfluss des Gichtwindvolumens auf die Rückoxidation des Zinkes festzustellen, wurden zusätzliche Berechnungen durchgeführt. Dabei variiert man die Menge der eingeblasenen Sekundärluft. Bild 57 zeigt das Verhältnis zwischen den Komponenten der Gasphase bei verschiedenen Gichtwindvolumina.

Obwohl eine Vergrößerung des Gichtwindes um 25 % nur eine Erhöhung des gesamten Volumens um ca. 2 % verursacht, kommt es zur Veränderung der Zusammensetzung der Abgase im IS-Ofen, weil dem System mehr Sauerstoff und Stickstoff zugeführt werden. Es ist zu erkennen, dass durch die Erhöhung des Gichtwindvolumens der Stickstoffgehalt in der Gasphase steigt. Infolge der Zunahme der Sekundärluftmenge wird dieser Wert um 0,5 % größer. Wenn 40 % mehr Gichtwind eingeblasen wird, beträgt der Stickstoffgehalt ca. 58,4 %. Wenn das Volumen der Sekundärluft um 25 % abnimmt, sinkt der Stickstoffanteil in der Gasphase auf 57,2 %.

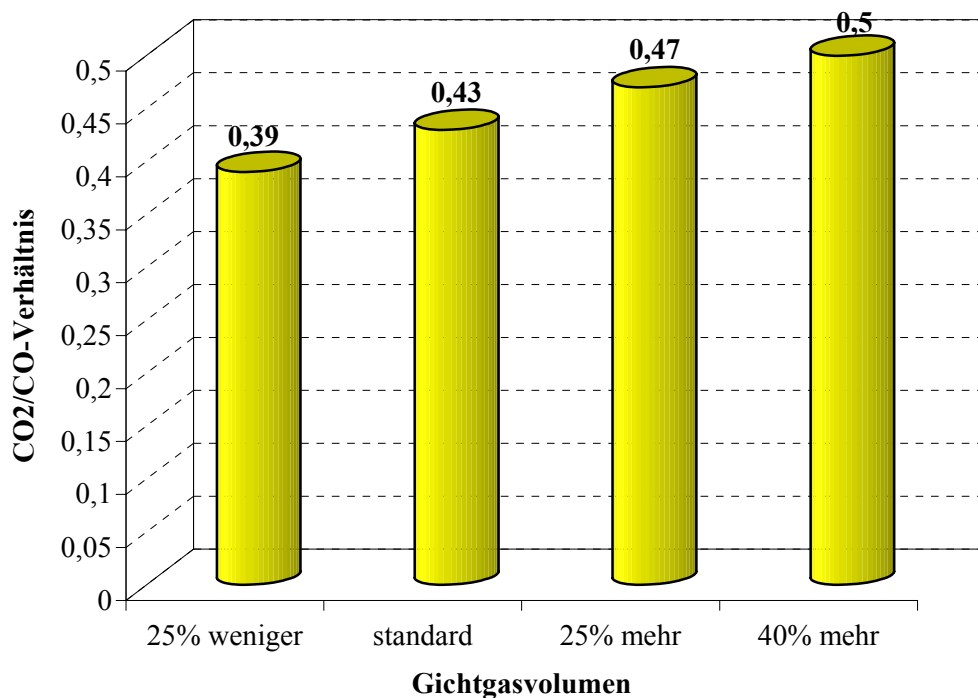


**Bild 57:** Vergleich der Gasphasenzusammensetzung bei verschiedenen Gichtwindvolumina

An Hand des Bildes ist festzustellen, dass in den Abgasen durch die Erhöhung des Gichtwindvolumens eine leichte Verdünnung des Zinkes auftritt. Die Zinkmenge bleibt dabei

konstant, aber sein Gehalt geht prozentual von 8,66 % auf 8,5 % zurück, wenn 40 % mehr Sekundärluft eingesetzt wird.

Eine Erhöhung des Gichtwindvolumens beeinflusst auch den Gehalt von CO und CO<sub>2</sub>. Um die dabei auftretenden Veränderungen anschaulich zu zeigen, ist Bild 58 dargestellt. Hier ist das CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis in Abhängigkeit vom Gichtwindvolumen präsentiert. Durch die Zunahme der eingeblasenen Sekundärluftmenge um 25 % tritt eine Abweichung des CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnisses von 0,43 auf 0,47 auf. Bei der Erhöhung des Gichtwindvolumens auf 40 % vergrößert sich dieser Wert auf 0,5. Für diese Erscheinung gibt es folgende Erklärung: Weil mehr Sauerstoff mit dem Gichtwind ins System eingeblasen wird, wandeln sich im System größere CO-Mengen zu CO<sub>2</sub> um. Aus diesem Grund nimmt das CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis deutlich zu. Bei einer Verringerung des Gichtwindvolumens findet das Gegenteil statt. Bild 58 zeigt, dass dieser Wert bei 0,39 liegt.

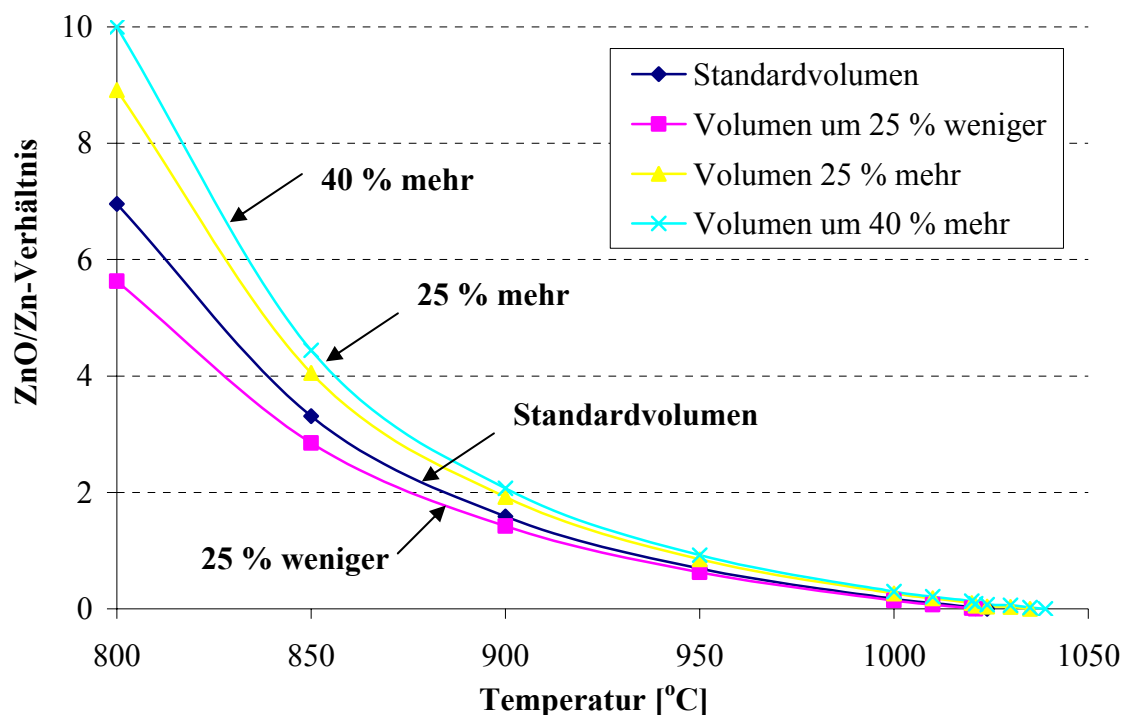


**Bild 58:** Das CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina

Aus dem dargestellten Bild 59 ist die Wirkung des Gichtwindvolumens auf die Rückoxidation des Zinkes ersichtlich. Es sind deutlich die auftretenden Veränderungen zu sehen, wenn mehr oder weniger Sekundärluft ins Modell eingeblasen wird. Alle Berechnungen wurden ohne Berücksichtigung des Einflusses von Wasserdampf durchgeführt.

Es ergeben sich vier Kurven, die einen ähnlichen Verlauf aufweisen und die Aussagen zum Einfluss der Sekundärluftmenge auf die Rückoxidation des Zinkes zulassen. Durch die Abnahme des Gichtwindvolumens um 25 % entsteht weniger ZnO im System. Mit der

Erhöhung des Gichtwindvolumens erfolgt ein erheblicher Anstieg der Rückoxidation des Zinkes im System. Je größer die Menge der Sekundärluft ist desto höher liegt die entsprechende Kurve. Durch die Erhöhung des Gichtwindvolumens um 40 % erreicht man die höchste Rückoxidation des Zinkes. Dabei liegt das Metall bei einer Temperatur von 800 °C hauptsächlich oxidisch vor.



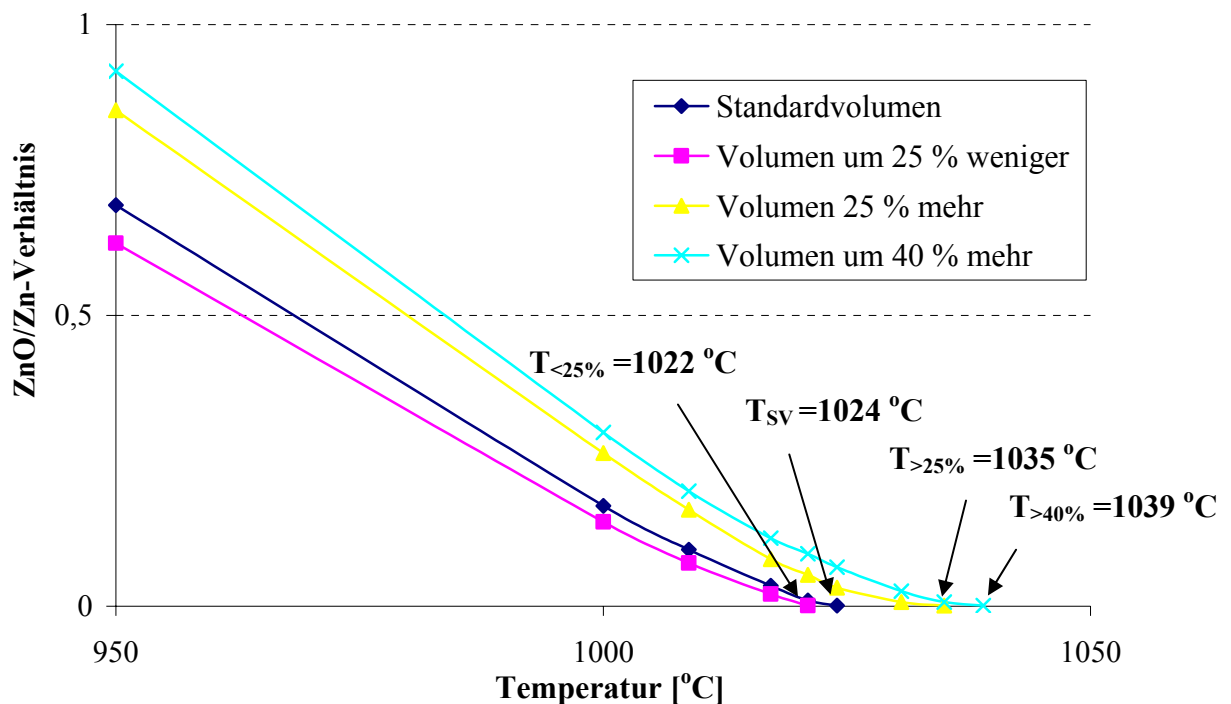
**Bild 59:** ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Gichtwindvolumina

Auf dem Bild 60 ist die Vergrößerung eines Abschnittes des Bildes 59 dargestellt. Darauf ist der Verlauf der Kurven im Temperaturbereich zwischen 950 und 1050 °C präsentiert. Es ist gut zu erkennen, dass mit der Zunahme des Gichtwindvolumens mehr ZnO entsteht, weil der Anteil von CO<sub>2</sub> in der Gasphase auch höher ist. Bei einer Temperatur von 1000 °C tritt eine Zunahme der Rückoxidation des Zinkes um 6 % ein, wenn 25 % mehr Sekundärluft ins System eingeblasen wird. Eine weitere Erhöhung des Gichtwindvolumens verursacht noch eine zusätzliche Vergrößerung des ZnO/Zn-Verhältnisses im System auf ca. 8 % des gesamten Zinkes.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Entstehung des ZnO bei höheren Temperaturen anfängt, wenn mehr Sekundärluft verwendet wird. Beim Standardvolumen des Gichtwindes beginnt die Rückoxidation des Zinkes bei 1024 °C. Aufgrund der Zunahme der Sekundärluftmenge erfolgt eine Verlagerung dieses Temperaturwertes auf 1035 °C bei + 25 %



und auf 1039 °C bei + 40 %. Dies ist hinsichtlich der Ansatzbildung sehr ungünstig, weil höhere Temperaturen im System erforderlich sind, um das Ansatzwachstum zu minimieren.



**Bild 60:** ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Gichtwindvolumina im Temperaturbereich zwischen 950 und 1050 °C

Infolge der Zunahme des Gichtwindvolumens reagiert mehr CO mit Sauerstoff zu CO<sub>2</sub>. Dabei wird zusätzliche Wärme freigesetzt. Diese führt zur Erhöhung der Temperatur im System. Als Ergebnis könnten die „kalten“ Zonen an den Wänden stark verringert oder vollständig abgebaut werden. Dadurch könnte die Ansatzbildung verringert werden. In der Originalanlage ist dies aufgrund der Wärmeverluste während der Beschickung des Ofens kaum zu realisieren. Es ist noch ein mal zu betonen, dass die Temperatur im System konstant angenommen wurde. Die durch zusätzliche Nachverbrennung des Kohlenmonoxides entstehende Wärme kann nicht berücksichtigt werden.

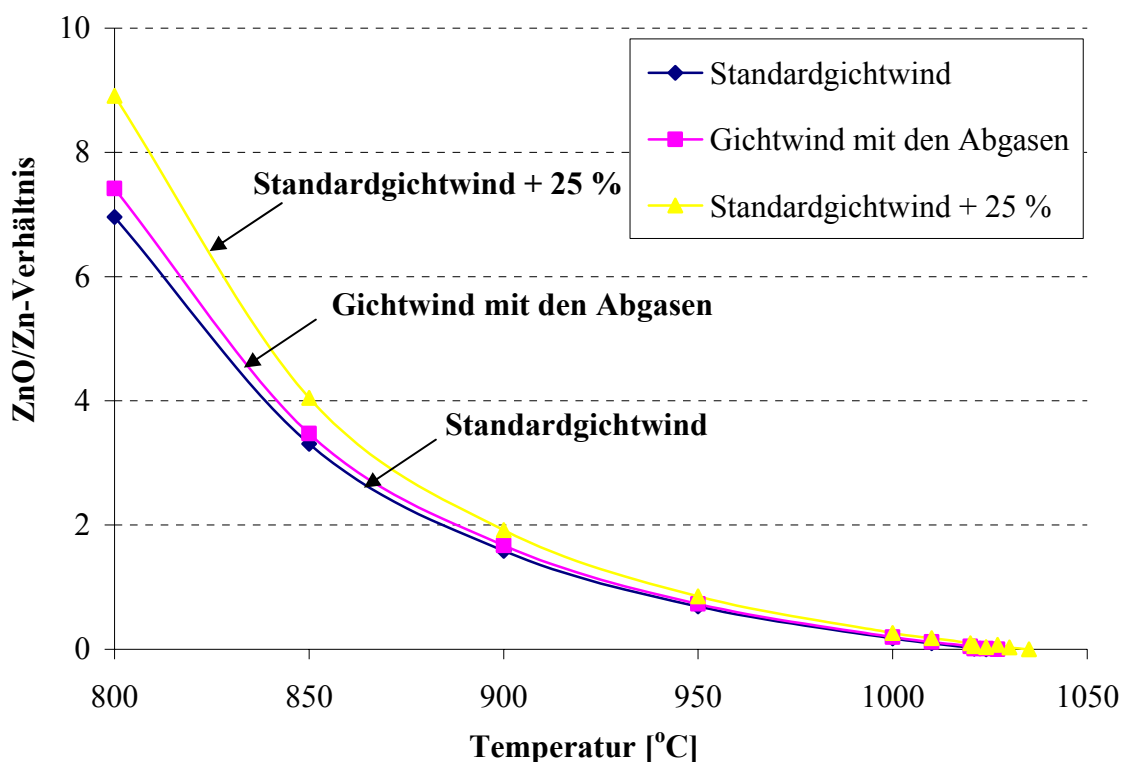
Wie schon bei der Beschreibung der Strömungsprofile ( s. Kapitel 6.3.3. ) erwähnt wurde, erreicht man durch die Erhöhung des Gichtwindvolumens eine höhere Gasgeschwindigkeit beim Einblasen im Oberofen. Dadurch werden neben dem aufsteigenden Ofengasstrom die mitgerissenen Staubpartikel effektiver abgebremst. Aus diesem Grund liegt die Annahme nahe, dass die möglichen ZnO-Verluste durch den höheren CO<sub>2</sub>-Anteil in den Abgasen unter der Wirkung der anderen technologischen Parameter, wie z.B. höhere Temperatur, überdeckt werden. Im Ergebnis wird ein Rückgang der Ansatzbildung im Vergleich zu den anderen

Einstellungen der Gichtwinddüsen im Zusammenspiel von verschiedenen Faktoren ( größeres ZnO/Zn-Verhältnis, höhere Geschwindigkeit und Temperatur, bessere CO-Nachverbrennung ) erwartet.

Wie schon betont wurde, entsteht im System infolge der Zunahme des Gichtwindvolumens mehr CO<sub>2</sub>, welches mit gasförmigem Zink reagiert. Im Ergebnis ergibt sich eine höhere Menge an ZnO.

Als alternative Lösung kann man einen Teil der Abgase nach dem Kondensator zusammen mit dem Gichtwind in den Ofen zurückführen. Die beiden Gasströme weisen dabei eine ähnliche Temperatur von ca. 700 °C auf. Dadurch gelingt es, die positive Wirkung des erhöhten Gichtwindvolumens effektiv einzusetzen. Andererseits ist der Sauerstoff in den Abgasen bereits als CO oder als CO<sub>2</sub> gebunden. Im Ergebnis wird das CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis durch die Zunahme der Sekundärluftmenge kaum beeinflusst.

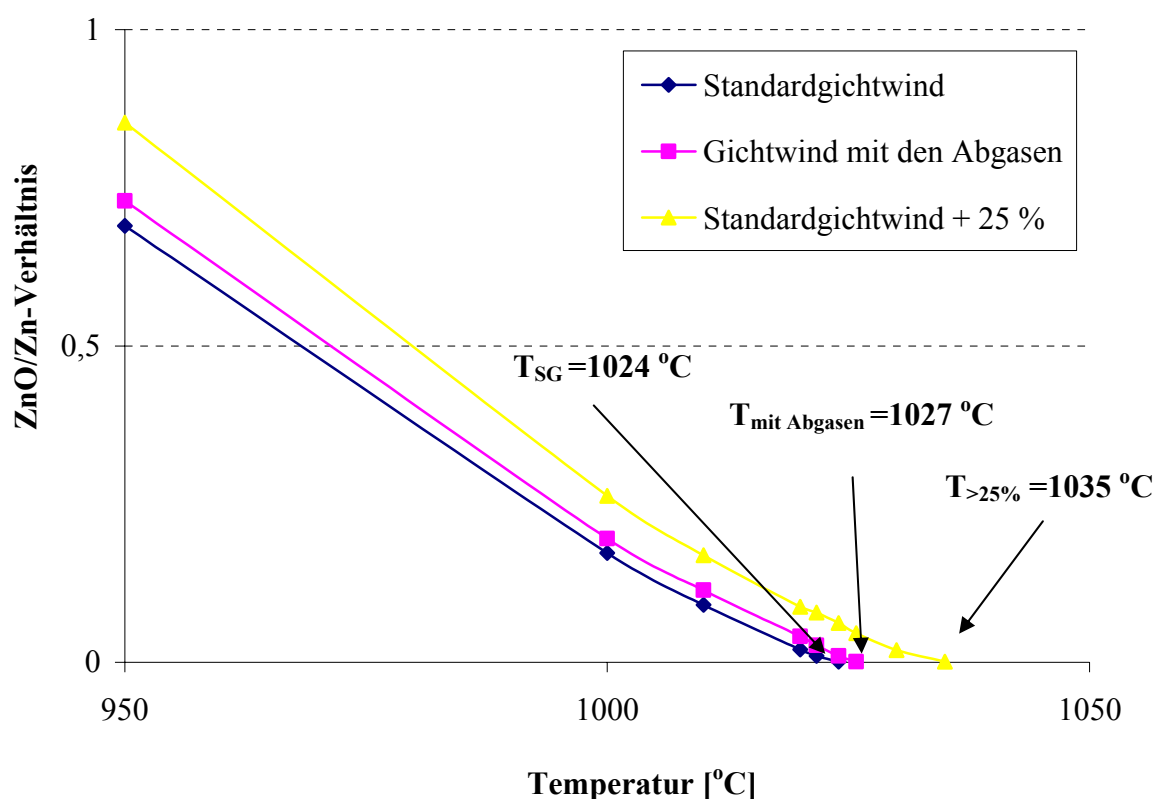
Die Erhöhung des Gichtwindvolumens um 25 % wurde durch die Zugabe der nach dem Kondensator entnommenen Abgase, die keinen freien Sauerstoff beinhalten, erreicht. Die ermittelten Daten wurden mit den Ergebnissen verglichen, die beim Standard und um 25 % erhöhten Gichtvolumen berechnet wurden.



**Bild 61:** ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Volumina und Zusammensetzungen des Gichtwindes

Bild 61 zeigt das ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Volumina und Zusammensetzungen des Gichtwindes in Abhängigkeit von der Temperatur. Es ergeben sich wieder die Kurven mit einem ähnlichen Verlauf. Es ist gut zu erkennen, dass sich beim Einblasen vom Gichtwind mit Abgasanteil im Vergleich zum um 25 % erhöhten Standardgichtwindvolumen weniger ZnO bildet. Die Rückoxidation des Zinkes geht dabei deutlich zurück. Die ermittelten ZnO/Zn-Verhältnisse liegen trotzdem über denen, welche für das Standardgichtwindvolumen berechnet wurden. Der Grund dafür ist, dass eine mehr  $\text{CO}_2$  mit den Abgasen ins System zugegeben wird, wodurch mehr Zink zu Oxid umgewandelt wird.

Um die Unterschiede besser zu illustrieren ist hier Bild 62 dargestellt. Darauf ist der Verlauf der Kurven im Temperaturbereich zwischen 950 und 1050 °C präsentiert. Die Erhöhung des Volumens der Sekundärluft durch Zugabe der Abgase führt bei einer Temperatur von 1000 °C zur Zunahme der Rückoxidation des Zinkes um ca. 2 %. Wenn 25 % mehr Standardgichtwind eingeblasen werden, liegt dieser Wert deutlich höher ( um 4 % ). Bei der Zugabe der Abgase kommt es nur zu einer geringfügigen Verschiebung der Temperatur, bei welcher die Rückoxidation des Zinkes im System anfängt. Dieser Wert wird dabei um 3 °C von 1024 auf 1027 °C verschoben.



**Bild 62:** ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Volumina und Zusammensetzungen des Gichtwindes im Temperaturbereich zwischen 950 und 1050 °C

Aus den Bildern geht deutlich hervor, dass die Rückoxidation des Zinkes beim Einblasen der aufgrund der Abgase um 25 % höheren Sekundärluftmenge im Vergleich zum Standardgichtwindvolumen in einer Größenordnung liegt. Obwohl etwas mehr ZnO entsteht, sollten diese Verluste durch eine effektivere Verwirbelung der beiden Gasströme ausgeglichen werden. Diese Maßnahme ist technisch mit dem entsprechenden Umbau der IS-Anlage verbunden, weil ein zusätzliches Gebläse erforderlich ist.

An Hand der Strömungsprofile ( s. Bilder 37 und 41 ) und der Ergebnisse der thermodynamischen Berechnungen lassen sich die Aussagen zur möglichen Verringerung der Ansatzbildung im IS-Ofen infolge der Erhöhung des Gichtwindvolumens durch die Zugabe eines Teiles der Abgase nach dem Kondensator treffen. Auf einer Seite ermöglicht diese Maßnahme im Vergleich zu den anderen Einstellungen der Düsen eine bessere Verwirbelung im Oberofen, die bis zu den wandnahen Gebieten reicht ( s. Kapitel 6.3.3. ). Andererseits gelingt es durch die Erhöhung des Volumens des Gichtwindes die Primärluft effektiver abzubremesen. Dadurch kann die Nachverbrennung des Kohlenmonoxides beeinflusst sowie die Temperatur in den Totzonen im Ofen erhöht werden. Das alles kann laut den thermodynamischen Berechnungen zur Reduzierung der Ansatzbildung im Originalofen führen, weil sich weniger Zink zu ZnO umwandeln kann.

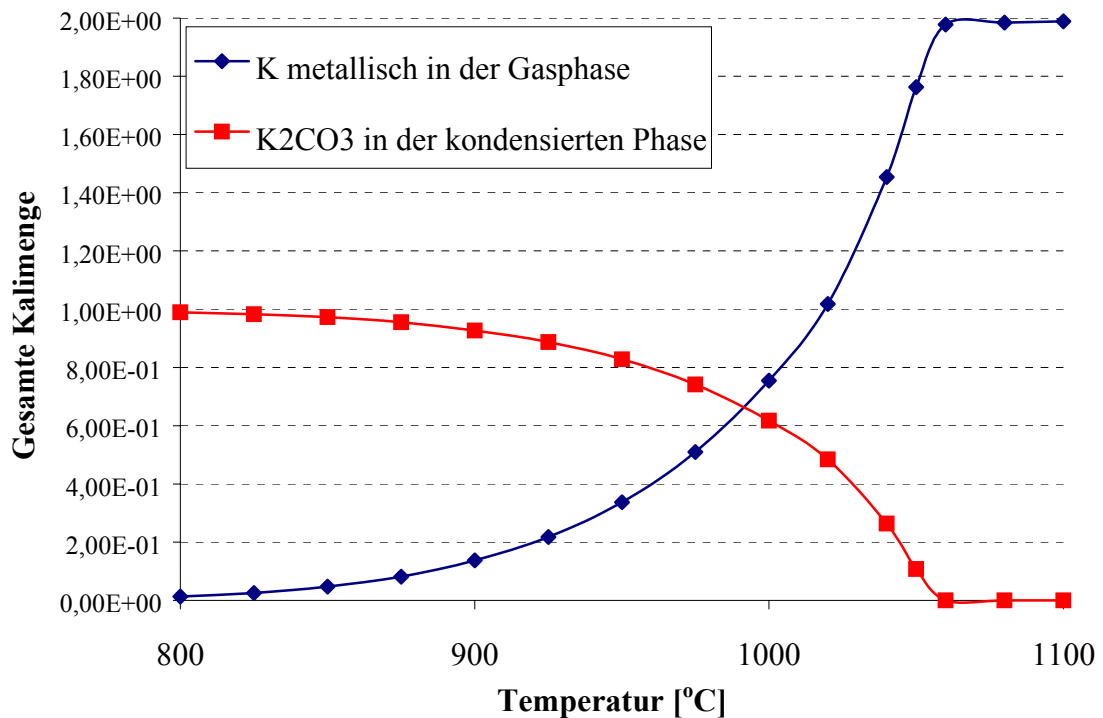
Im letzten Schritt wurde das mögliche Verhalten von anderen Komponenten, die das Ansatzwachstum begünstigen können, beschrieben. Dies betrifft in der ersten Linie die Alkalimetalle. In unserem Fall von Bedeutung sind Alkalisilikate, -karbonate und -oxide. Es folgt die Simulation am Beispiel von Kalium.

Das Bild 63 zeigt die bei der Modellierung erhaltenen Ergebnisse. Es bilden sich nach der Berechnung metallisches Kalium und  $K_2CO_3$ , wenn das Metall in den Eingangsdaten als  $K_2O$  vorliegt. Betrachtet man den Konzentrationsverlauf von metallischem Kalium in den Abgasen in Abhängigkeit von der Temperatur, so ist die Konzentrationszunahme mit dem Temperaturanstieg ersichtlich. Gegenläufig verhält sich Kaliumcarbonat in der kondensierten Phase. Über einer Temperatur von 1060 °C ist nur metallisches Kalium im System zu erkennen. Auf der anderen Seite nimmt die  $K_2CO_3$ -Konzentration mit der Temperatursenkung stark zu. Bei 800 °C ist das Metall fast vollständig als Karbonat gebunden. Der Schnittpunkt der beiden Konzentrationsverläufe gibt an, bei welcher Temperatur die Verteilung von diesen Komponenten zwischen den Phasen gleich ist.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die anderen Alkalimetalle ( an erster Stelle Natrium ) ein ähnliches Verhalten aufweisen. Außerdem können andere Verbindungen mit Alkalimetallen, wie z.B. Zyanide, in der Gasphase entstehen. Die Modellierung hat sie nur in

den Abgasen nachgewiesen, und ihr Gehalt ist dazu im Vergleich mit der Gesamtmenge an diesen Komponenten sehr niedrig und liegt unter 1 %.

Die Modellierung zeigt, dass sich die als Chloride vorliegenden Alkalimetalle nur in der Gasphase befinden, aber am Ansatzwachstum nicht teilnehmen. Die Alkalisilikate liegen im untersuchten Temperaturbereich fast vollständig in der kondensierten Phase vor.

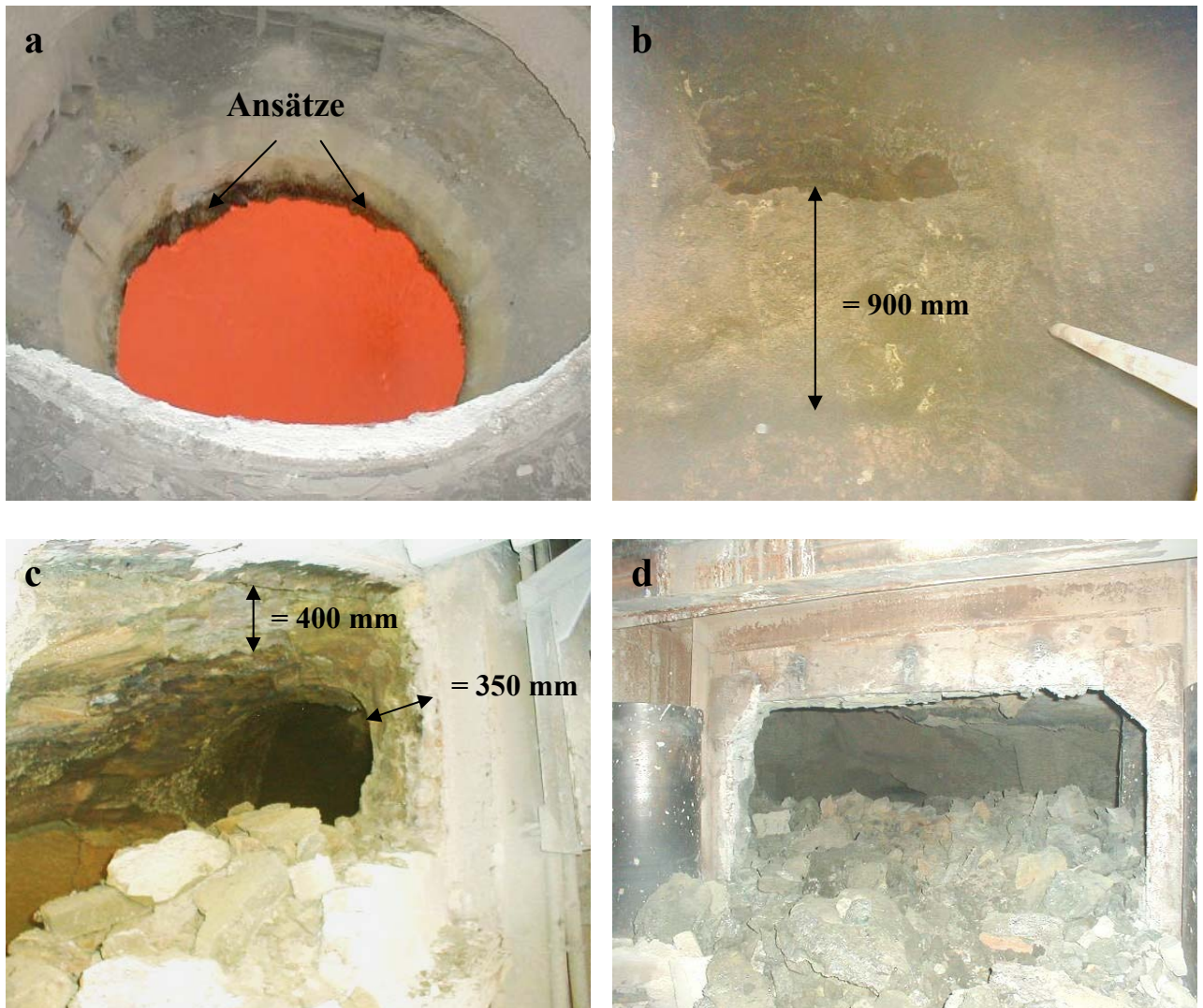


**Bild 63:** Konzentrationsverläufe von K und K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in Abhängigkeit von der Temperatur

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ansatzbildung im IS-Ofen an Hand der thermodynamischen Berechnungen nachvollzogen werden kann. Dabei werden die Bedingungen erläutert, unter welchen die Ansätze entstehen und anschließend wachsen können. Zusammen mit den aufgenommenen Strömungsprofilen können die Ergebnisse der thermodynamischen Berechnungen die möglichen Wege zur Reduzierung des Ansatzwachstums, wie z.B. Erhöhung der Temperatur im Oberofen, Verringerung des CO<sub>2</sub>-Anteils in der Gasphase u.a., zeigen. Es ist zu betonen, dass die in dem Modell erhaltenen Strömungsprofile und Computersimulation nicht ausreichen, um endgültige Aussagen zu Entstehung und Wachstum der Ansätze zu treffen. Die hier gewonnenen Daten müssen zusätzlich mit den Ergebnissen der Analysen der Ansatzproben aus dem IS-Ofen verglichen und ausgewertet werden.

## 8. Untersuchungen der Ansätze

So bedeutungsvoll die Ansatzerscheinungen im IS-Ofen sind, so wenig hat man sich damit beschäftigt, ihre Problematik zu systematisieren. Die an den Wänden ständig wachsenden Ansätze stellen ein großes Problem beim IS-Verfahren dar. Sie können bei unkontrolliertem Wachstum die Betriebsparameter des Verfahrens stark beeinträchtigen.



**Bild 64a, b, c und d:** Die Ofenansätze: a - Öffnung für die Chargierglocke, b - Austritt, c - Übergangsbereich, d - Kondensator,

Die präsentierten Bilder sollen einen Eindruck von den Ausmaßen der Schachtansätze im IS-Ofen bei MHD vermitteln. Sie erstrecken sich über die gesamte Übergangsbereich- und Kondensatorlänge bei einer Dicke von bis zu 800 mm. Ein Ansatz wächst sehr schnell heran, wenn seine Bildung erst einmal begonnen hat. In wenigen Tagen kann er eine solche Mächtigkeit erreichen. Die nachteiligen Auswirkungen solcher Profileinengungen auf die

Ofenparameter sind bekannt: Erhöhung des spezifischen Koksverbrauchs und Verringerung des Wirkungsgrades des IS-Prozesses.

Die aus den Ergebnissen der Modelluntersuchungen gezogenen Schlussfolgerungen zur negativen Wirkung der Düseneinstellung, bei welcher der Gichtwind in Richtung Vorderwand eingeblasen wird, auf die Ofenführung hinsichtlich der Ansatzbildung werden durch die Beobachtung der Ansätze im Originalofen bestätigt ( s. Kapitel 6.3.4. ). Dadurch entstehen die Bedingungen, unter denen es zum verstärkten Ansatzwachstum an der unteren Kante des Austrittes kommt. Die präsentierten Fotos ( s. Bild 64b ) des Oberofens bekräftigen diese Aussagen.

### **8.1. Beseitigung der Ansätze bei MHD**

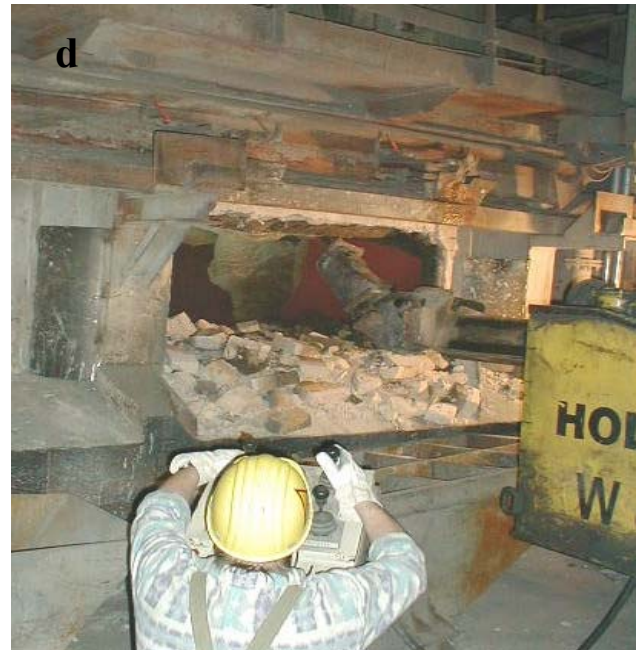
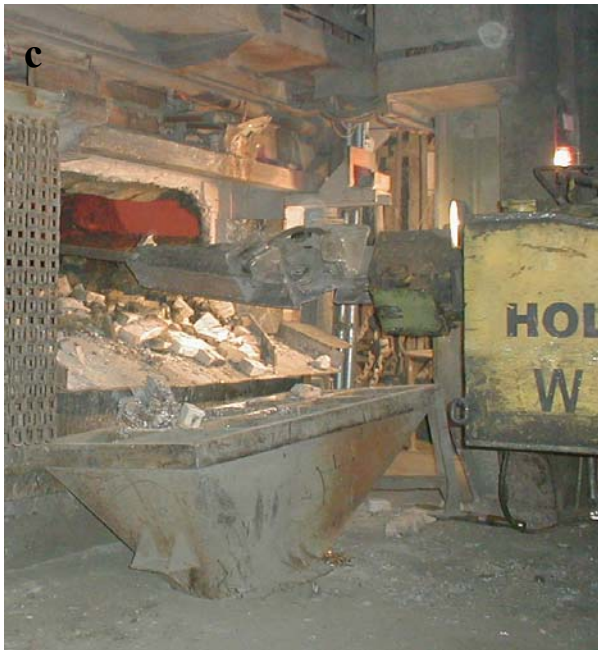
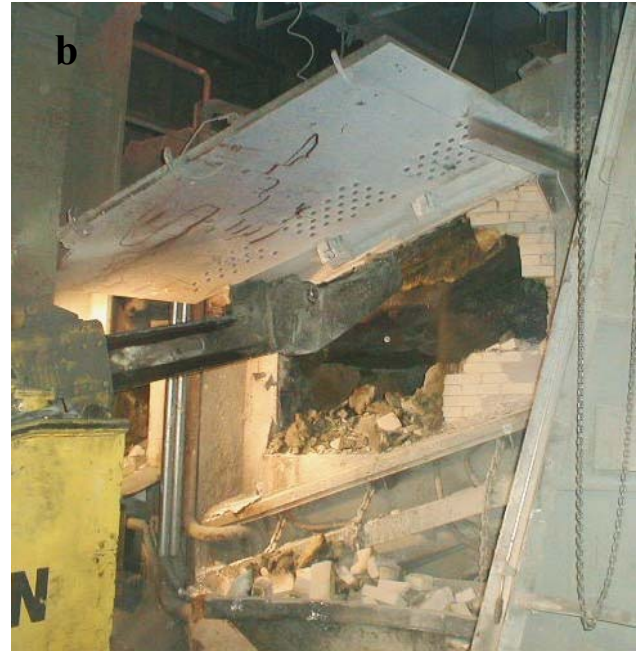
Die Methode der Ansatzentfernung muss unbefriedigend bleiben, solange es möglich sein könnte, die Ansatzbildung zu vermeiden bzw. deutlich einzuschränken.

Um die Ansätze zu beseitigen muss die gesamte Anlage ( Ofen, Kondensator, Gasreinigungssystem ) regelmäßig gereinigt werden. Im Laufe der Jahre hat sich das Entdecken und das Entfernen von Ansätzen zu einem schnellen und sicheren Verfahren entwickelt. Der Ofen wird einmal pro Woche stillgelegt, damit man mit der Hilfe von Presslufthämmern die Ansätze entfernen kann. Man hat versucht diese so genannte „Putzschicht“ zu verzögern d.h. nicht so häufig zu reinigen. Die Ansätze sind aus der Anlage nach 10 Tage, nach zwei Wochen und sogar nach 3 Wochen beseitigt worden, damit der Ofen länger im Betrieb bleiben konnte. Aber diese Maßnahme hat sich nicht bewährt. Wegen des größeren Ansatzumfanges hat man mehr Zeit gebraucht, um den Ofen zu reinigen. Die Stillstandszeiten wurden deutlich länger. Um die Reinigung zu verbessern, bzw. zu beschleunigen, wurden die Ansätze gesprengt. Aus der jahrelangen Betriebserfahrung hat es sich als metallurgisch und wirtschaftlich vorteilhaft erwiesen die Putzschicht einmal pro Woche durchzuführen. Der Umfang der notwendigen Arbeiten ist so, dass die Reinigung bis zu 12 Stunden dauert.

Die folgende Beschreibung der Ansatzbeseitigung an der IS-Anlage bei MHD entspricht daher ganz allgemein der dort üblichen Arbeitsweise.

Etwa 4 h vor dem Stillsetzen des Ofens wird der Wind gänzlich abgestellt. Das gilt für den Heiß- sowie für den Gichtwind. Mit den letzten zwei Chargierungen werden 5 t Koks ( 1,25 t pro Glocke ) extra geladen. Dies führt zur Erhöhung der Gichttemperatur im Oberofen um 250-300 C°, dabei beginnen die Ansätze zu schmelzen. Etwa 3 h vor dem Stillsetzen wird die Chargierung eingestellt.





**Bild 65a, b, c und d:** Entfernung der Ansätze bei MHD

Die Beschickungsoberfläche sinkt mit einer Geschwindigkeit von rd. 2 m/h. Inzwischen werden die Glockenverschlüsse geöffnet und der Abstich der Schlacke und des Werkbleis erfolgen. In etwa 2 Stunden wird die ganze Anlage stillgelegt. Alle Verschlüsse werden geöffnet. Zuerst werden die Gichtwinddüsen gereinigt. Das Gas im Ofen verbrennt üblicherweise ohne Explosion. Nachdem das Gas 30 Minuten abgesaugt wird, werden die Glocken geöffnet und abtransportiert. Sie werden draußen nach der Abkühlung gereinigt. Mit Presslufthämmern werden Fenster ( Spiegel ) in das Mauerwerk gebrochen. Selbstverständlich erfordert die Entfernung der Ansätze viel Erfahrung. Davon hängt auch die



Zeit, die man für einen Ansatz braucht, ab. Außerdem kommt es auf dem Aufbau des Ansatzes an, z.B. die voluminösen aber weichen Ansätze von der Glockendecke können schneller entfernt werden, während die harten Ansätze aus dem Austrittsbereich 6 bis 7 h oder sogar mehr in Anspruch nehmen können.

Zuerst wird ein Fenster an der Seite des Kondensators gebrochen. Mit weiterer Anlagenabkühlung werden Spiegel im Übergangsbereich und anschließend in der Ofenmauer gebrochen. Nun dauert es etwa 2 h, bis der Rauch weniger dicht und der Ofen kalt genug ist, um den Ansatz durch die Fenster am Schacht zu erkennen. Nun können die Stellen bestimmt werden, von denen aus die Ansätze entfernt werden müssen. Je nach der Stärke und der Menge der Ansätze wird die Putzschicht bis zu 12 h ausgedehnt.

Auch wenn das Entfernen von Ansätzen bei MHD in Duisburg heute keine großen Schwierigkeiten mehr macht, so bleibt doch die Notwendigkeit, Wege zu suchen, die Ansatzbildung weitmöglichst einzuschränken. Die Ansatzbeseitigung ist wohl mehr eine Notmaßnahme als eine gute Lösung.

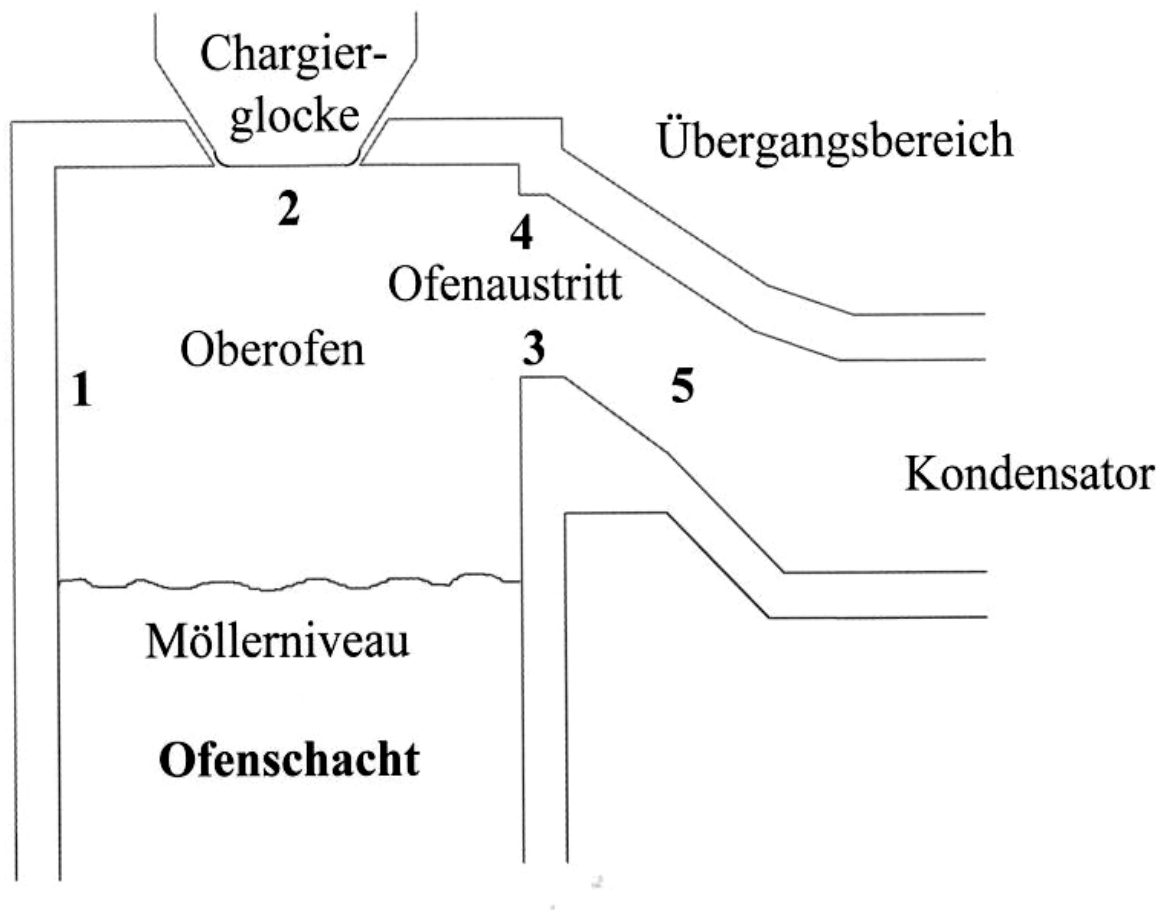


**Bild 66:** Übergangsbereich vor und nach der Putzschicht

## 8.2. Probenahmestellen

Die bevorzugten Stellen des Ansatzwachstums sind bekannt. Die bei MHD festgestellten Ansätze treten hauptsächlich an der unteren Kante des Austritts im Schacht, an der Ofendecke und im Übergangsbereich zum Kondensator auf. Sie führen schon in einem frühen Stadium ihrer Bildung zu Problemen bei der Durchgasung über den Querschnitt. Die Dicke der Ansätze kann bis zu 800 mm im Schacht und bis zu 400 mm im Übergangsbereich betragen. Zur Untersuchungen der Ansätze wurden Proben aus dem Ofen herausgebrochen. Die Probenahme erfolgte unter vergleichbaren Bedingungen. Bei langen Stillständen wurden auch

Proben von der Ofenwand ( die Probenahmestelle liegt auf dem Gichtwinddüseniveau gegenüber dem Austritt ) entnommen. Unter anderen sind Proben von der Glockenoberfläche, von der oberen und unteren Kante des Ofenaustritts und aus dem Übergangsbereich zwischen dem Schacht und dem Kondensator herausgebrochen worden ( s. Bild 67 ). Jede Probe ist in einer Mühle zu Pulver zermahlen worden. Ein Teil davon ist bereits bei MHD hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung untersucht worden. Eine ungemahlene Probe von jeder Probenahmestelle wurde eingebettet und geschliffen, um die elektronenmikroskopischen und röntgenographischen Untersuchungen durchführen zu können. Außerdem wurde die Festigkeit von diesen Proben gemessen. Sie kamen auch zur Analyse der chemischen Zusammensetzung. Alle diese Untersuchungen sollen die Ursachen der Ansatzbildung aufzeigen und den Einfluss der Strömungsbedingungen im Oberofen feststellen.



**Bild 67:** Probenahmestellen der Ofenansätze: 1-Ofenwand, 2-Glockenoberfläche, 3-Austritt, Unten, 4-Austritt, Oben, 5-Übergangsbereich

### 8.3. Die Ergebnisse der chemischen und der röntgenographischen Untersuchungen

Die chemische Analyse eines Ansatzes lässt Aussagen darüber zu, ob und wo sich bestimmte Komponenten angereichert haben. Daraus werden Rückschlüsse auf die Entstehung möglich. Dabei darf jedoch eine Veränderung der Ansatzprobe durch Wärmebehandlung und Vorbereitungsvorgänge nicht übersehen werden. Die mikroskopischen und röntgenographischen Untersuchungen geben darüber hinaus Information über Herkunft und Verteilung der Phasen.

Meist ist der Ansatz schichtförmig aufgebaut. Dabei besitzt jede Schicht je nach der Probenahmestelle eine individuelle Ausprägung. Ein Ansatz erscheint mikroskopisch als ein harter, steinartige Körper, dessen Porosität je nach Entstehungsbedingungen von kleinen bis zu sehr hohen Werten bei lockeren Ablagerungen an der Glockenoberfläche reichen kann. Mikroskopisch lässt sich eine Vielzahl von Unterschieden innerhalb jeder Probe erkennen. Zinkoxid ist der Hauptbestandteil aller Proben. Es bildet die Matrix für die Ansätze. Dadurch entstehen die Bindungsbrücken zwischen den Komponenten, die am Ansatzwachstum beteiligt sind.

Elemente	Probenahmestellen				
	Ofenwand	G.oberfläche	Austritt, Unten	Austritt, Oben	Übergang
<b>Zn</b>	74,06	77,58	64,74	64,7	64,92
<b>Pb</b>	7,32	5,13	15,49	15,95	12,11
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,93	1,25	0,76	0,49	1,06
<b>Fe</b>	1,05	0,78	1,17	0,19	0,32
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,09	0,075	0,93	0,84	1,83
<b>S</b>	0,54	0,17	0,98	0,17	0,31
<b>Cu</b>	0,14	0,15	0,13	0,02	0,02
<b>Al</b>	0,35	0,25	0,21	0,11	0,2
<b>Ca</b>	1,46	0,42	0,56	0,16	0,19

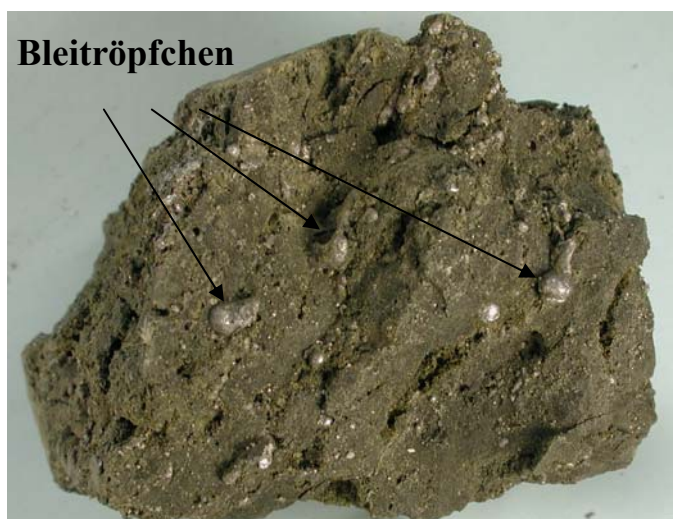
**Tabelle 6:** Mittlere chemische Zusammensetzung der Proben

Tabelle 6 zeigt die mittlere Zusammensetzung der Ansätze von allen Probenahmestellen. Für die chemischen und röntgenographischen Analysen wurde die ganze Probe mit Hilfe einer Mühle zu Pulver zermalen. Ein Teil davon wurde hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung untersucht. Der Rest wurde einer röntgenographischen Analyse unterzogen.

Die Ergebnisse der chemischen Analysen haben gezeigt, dass sich Zink bevorzugt am Aufbau der Ansätze beteiligt. Ein Teil des metallischen Zinkes wird oxidiert und als Zinkoxid

entweder an der Beschickung oder am Mauerwerk niedergeschlagen. In bestimmten Zonen treten starke Anreicherungen auf. Je nach der Stelle, wo die Probe entnommen worden ist, liegt der mittlere Zinkanteil bei 65-75 %. Im Übergangsbereich ist eine Abnahme der Zinkgehalte und eine Anreicherung an Blei festzustellen. Die chemische Hauptursache der Ansatzbildung ist die Rückoxidation des Zinks mit nachfolgender Kondensation des Zinkoxides an den „kalten“ Ofenwänden in strömungsarmen Bereichen des Ofens. Mittels Röntgenphasenanalyse konnte kein metallisches Zink festgestellt werden. Es wird unter den gegebenen Bedingungen am Ofenmauerwerk komplett oxidiert.

Auch Blei befindet sich in den Ansatzproben und nimmt maßgeblich am Ansatzwachstum teil. In jeder Probe wurde Blei in erheblichen Mengen gefunden. Es liegt metallisch in den zahlreichen Poren vor. Die chemische Analyse eines Tröpfchens wurde durchgeführt, um Klarheit über die Art des gefundenen Bleis zu gewinnen. Es wurde bestätigt, dass es sich um Kondensatorblei handelt.



**Bild 68:** Ansatzprobe von der oberen Kante des Austritts

Die Bleianalyse zeigte, dass die Bleieinschlüsse in den Ansätzen zu 95 % aus Pb bestehen und 3 % Zink enthalten. Das ist die typische Zusammensetzung des aus dem Kondensator stammenden Bleis. Bild 68 zeigt die Verteilung vom Blei in der Probe von der oberen Kante des Ofenaustritts. Die Rotoren versprühen das Metall zur Zinkaufnahme in Form eines feinen Nebels. Dadurch gelangt ein Teil der Bleitröpfchen auch an die Ofenwand gegenüber dem Austritt. Dort schlagen sie sich in Kugelform nieder und fließen teilweise in den Kondensator zurück. Dies führt zu erheblichen Mengen von flüssigem Blei in den Ansätzen. Ein geringer Teil vom Blei wird aus der Möllersäule von den Ofengasen mitgerissen. Die

Bleigehalte in den ausgebrochenen Proben liegen im Schnitt zwischen 6 und 25 % und weisen in der Tendenz eine deutliche Anreicherung in Richtung Kondensator auf. Durch Röntgenphasenanalyse wurde festgestellt, dass es hauptsächlich metallisch in allen Proben vorliegt, aber sich eine geringe Menge PbO an der Oberfläche der Bleitropfchen gebildet hat. Die aus dem Möller stammenden Eisen-, Calcium- und Siliziumoxide tragen geringfügig zum Ansatzwachstum bei. SiO<sub>2</sub> und CaO kommen mit Gehalten von 0,5 bis 2,5 % vor. Diese Verbindungen lagern sich als Staub aus dem Rauchgas an der Wand ab und beteiligen sich am Ansatzaufbau.

Die Eisengehalte der ausgebrochenen Proben des IS-Ofen liegen im Schnitt zwischen 0,2 und 1,2 %. Das Metall wurde im Schacht nach der chemischen Analyse in zwei Zonen gefunden. Im Bereich der Ofenwand lag 1,05 % und an der unteren Kante des Austritts 1,17 % Eisen vor. Die Ablagerung erfolgte durch die Erstarrung der flüssigen Teile der Beschickung an den Ofenwänden, weil diese Ofenteile in Berührung mit den zugegebenen Materialien standen. Dadurch passierte die Anreicherung an Eisen. In den anderen Probenahmestellen konnten keine nennenswerten Gehalte von Eisenverbindungen festgestellt werden. Das Metall liegt hauptsächlich als Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> vor.

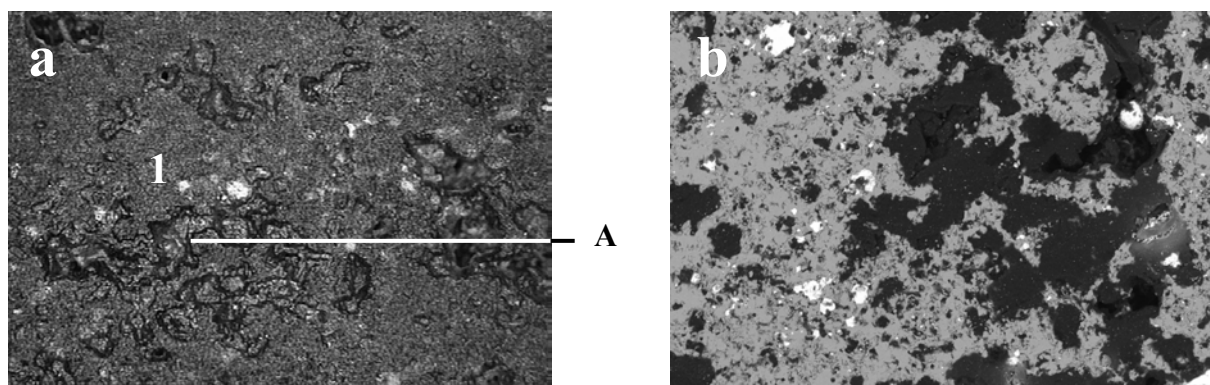
Relativ große Alkalimengen werden in den Proben vom Austrittsbereich gefunden, wo bis zu 1,3% ( K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O ) vorliegen. In den anderen Probenahmestellen sind keine Alkaliablagerungen nachweisbar, bzw. ihr Gehalt liegt unter 0,2 %. Die Menge an K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O beträgt in Heißbriketts ca. 1,5 %. Die Alkalielemente werden über die Beschickungsbestandteile zugeführt. Ihr Gehalt wird durch alte Batterien, die bei MHD im IS-Ofen verarbeitet werden, angereichert.

Die gefundenen Ablagerungen an Alkaliverbindungen sind ähnlich wie beim Zink hervorgerufen worden. Beim Aufsteigen der Metaldämpfe in die kälteren Zonen des Ofens tritt eine Reoxidation und Kondensation auf. Daher bilden sich feste sehr fein verteilte Natrium- und Kaliumverbindungen, die sich an den kälteren Beschickungsbestandteilen und an den Ofenwänden ansetzen.

Die Ergebnisse der chemischen Analyse bestätigen die ChemSage-Berechnungen, wonach die Alkalielemente bei den Arbeitstemperaturen in der Gasphase vorliegen ( s. Kapitel 7.2. ). Aufgrund der ständigen Kontrolle der Beschickungszusammensetzung auf Anwesenheit von Alkalimetallen wird deren Gehalt in den Einsatzstoffen gering gehalten. Aus diesem Grund ist die Wirkung von Na- und K-Verbindungen auf die Ansatzbildung vernachlässigbar.

Die anderen Komponenten ( wie Cu,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , C, Sn, u.a. ) liegen unter 0,2 % vor und üben keinen Einfluss auf das Ansatzwachstum aus.

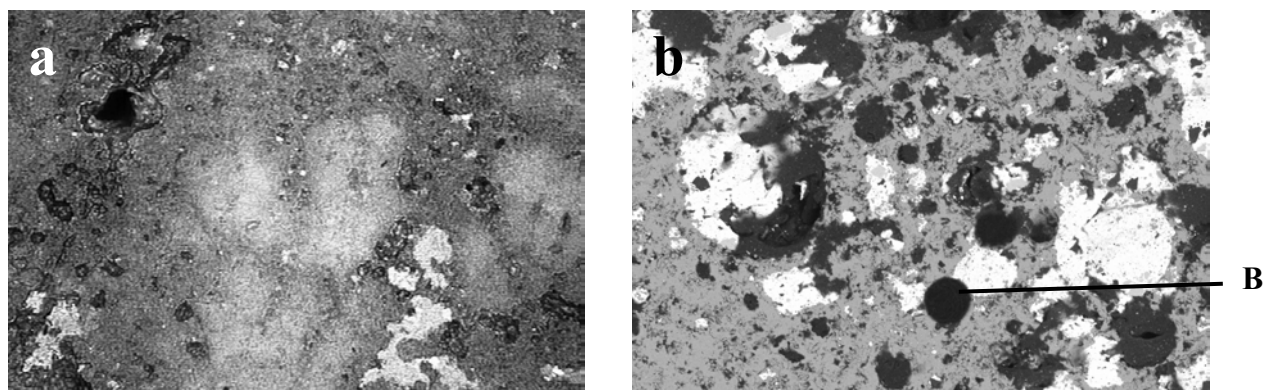
Alle entnommenen Proben bestehen zu 98 % aus ZnO und Pb. Deutliche Unterschiede ergeben sich nur in den Ansätzen, die von der Ofenwand ausgebrochen wurden. Hier wurden unterschiedliche Phasen wie  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nachgewiesen, die aus der Beschickung in den Ansatz gelangen können. Eine mögliche Ursache dafür ist die Einstellung der Gichtwindddüsen ( s. Kapitel 6.3.4. ). Weil die Sekundärluft in Richtung Vorderwand eingeblasen wird ( s. Bild 50, Seite 81 ), besteht die Möglichkeit, dass die kräftigen Einlaufströmungen die aus dem Schacht mitgerissenen Teilchen der Beschickung an die Wand drücken können. Der lokale Temperaturanstieg kann die Verklebung und das Überbacken der Staubpartikel am Mauerwerk verursachen und dadurch einen Belag zum Anhaften von Zinkoxidteilchen aufbauen. Dadurch kann an dieser Stelle eine Schicht aus Teilchen entstehen, an dem die Zinkoxidpartikel haften können. Diese Aussage bestätigt auch die Analysen der Ansatzproben, welche von der Vorderwand entnommen wurden ( s. Tabelle 6, Seite 103 ).



**Bild 69a und b:** Schliffbilder der Probe von der Ofenwand; Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1

Bei den elektronenmikroskopischen Untersuchungen der verschiedenen Proben wurde beobachtet, dass die Ansätze kein homogenes Gefüge besitzen sondern aus vielen Phasen aufgebaut sind, die auf Grund der Entstehungsbedingungen aneinander haften. Die Ansätze bestehen vorwiegend aus Zinkoxid, durchsetzt mit den Bleitropfchen. Alle Proben weisen eine poröse Struktur auf. In diesen Poren, die auf den elektronenmikroskopischen Aufnahmen dunkel zu erkennen sind, befindet sich Blei. In der Umgebung der Körner und an der Porenoberfläche befindet sich ein Bleioxidüberzug. Der graue Hintergrund ist vorwiegend Zinkoxid. Die hellen Körner sind die Bleitropfchen, ihre Zahl und Größe hängt von der Probenahmestelle ab. Die Ansätze, die am Ofenaustritt und im Übergang zum Kondensator wachsen, enthalten mehr Blei. Außerdem wiesen Proben aus diesen Bereichen eine geringere

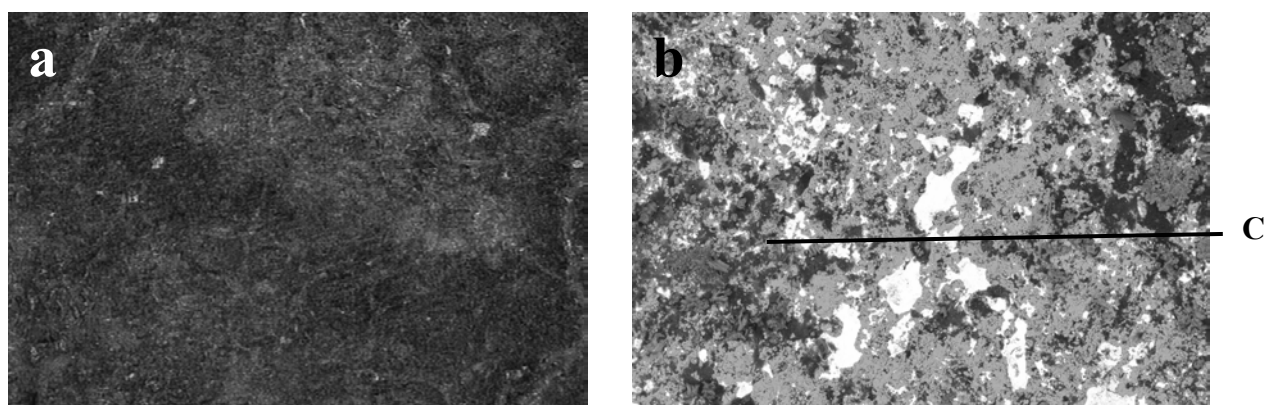
Porosität auf. Auf den Aufnahmen erkennt man die Löcher. An diesen Stellen befanden sich ebenfalls Bleitropfchen, die bei der mechanischen Vorbereitung der Proben verloren gingen. Bei den Untersuchungen der Proben von der Ofenwand wurde festgestellt, dass eine Staubablagerung in Betracht kommt. Der Ansatz besteht aus den pulverförmigen Komponenten der Beschickung ( A ), die in die Matrix eingebaut sind ( s. Bild 69a ). Der Staub bewirkt das Aneinanderkleben, bzw. er bildet die Bindungsbrücken zwischen den Staubkörnern und den Bleitropfchen.



**Bild 70a und b:** Anschliffbilder der Probe von der Glockenoberfläche;

Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1

In Anschliffen der Proben von der Glockenoberfläche ist Siliziumoxid ( B ) zu beobachten. Staubbörmiges  $\text{SiO}_2$  hat hier eine durchsichtige Glasphase gebildet, die dadurch auf der elektronenmikroskopischen Aufnahme schwarz erscheint ( s. Bild 70b ).



**Bild 71a und b:** Anschliffbilder der Probe von der unteren Kante des Austrittes;

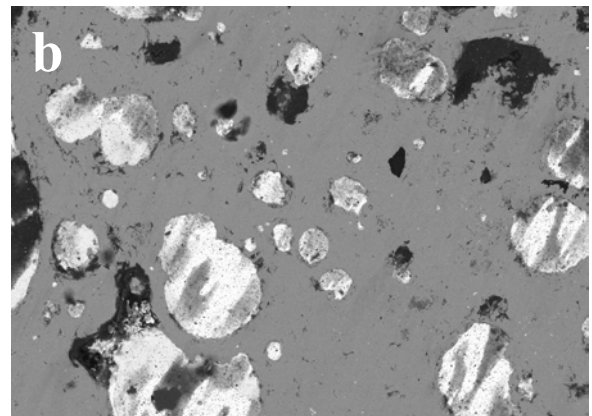
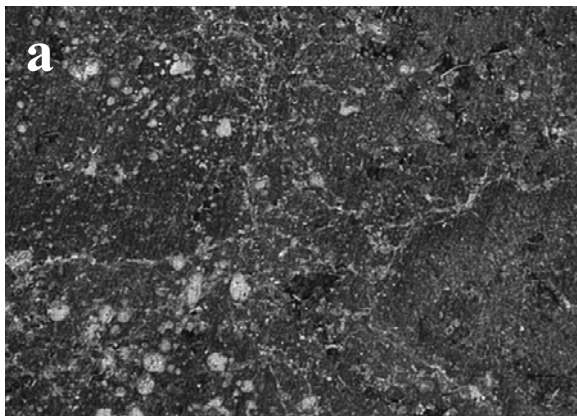
Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1

Bei der Probe von der unteren Kante des Austrittes wurden die Alkaliablagerungen nachgewiesen. Die ermittelte chemische Zusammensetzung dieser splittartigen Phase ( C )

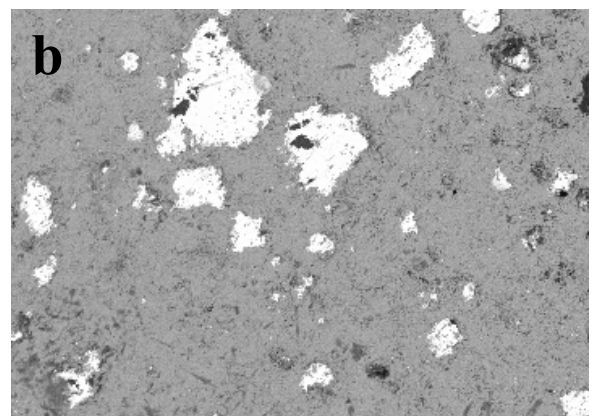
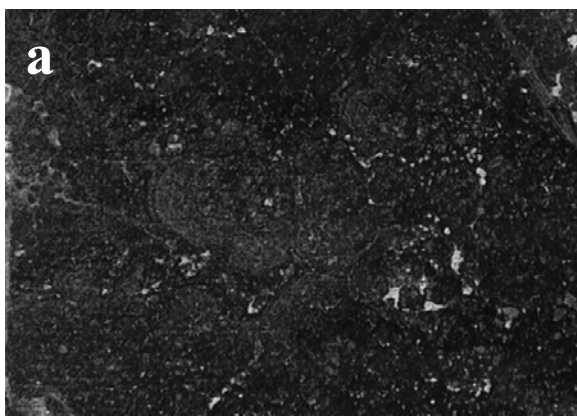


ergab, dass sie aus der Mischung von Zink-, Blei- und Kaliumoxiden besteht ( s. Bild 71b ). Kalium hat sich in diesen Anschliff bis über 4 % angereichert.

Die Ansatzgefüge der Proben vom Austritt sind aufgrund der Entstehungsbedingungen vergleichbar. Sie wiesen ähnliche Gefügestrukturen auf. Die Proben unterscheiden sich jedoch durch die Größe der Bleikörner. Die Risse auf dem Bild 72b sind bei der mechanischen Vorbereitung der Proben zur Analyse entstanden. Die kleinen schwarzen Punkte, die besonderes auf der weißen Bleikörneroberfläche erkennbar sind, stellen vermutlich Bestandteile des Schleifpapiers dar.



**Bild 72a und b:** Anschliffbilder der Probe von der oberen Kante des Austrittes;  
Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1



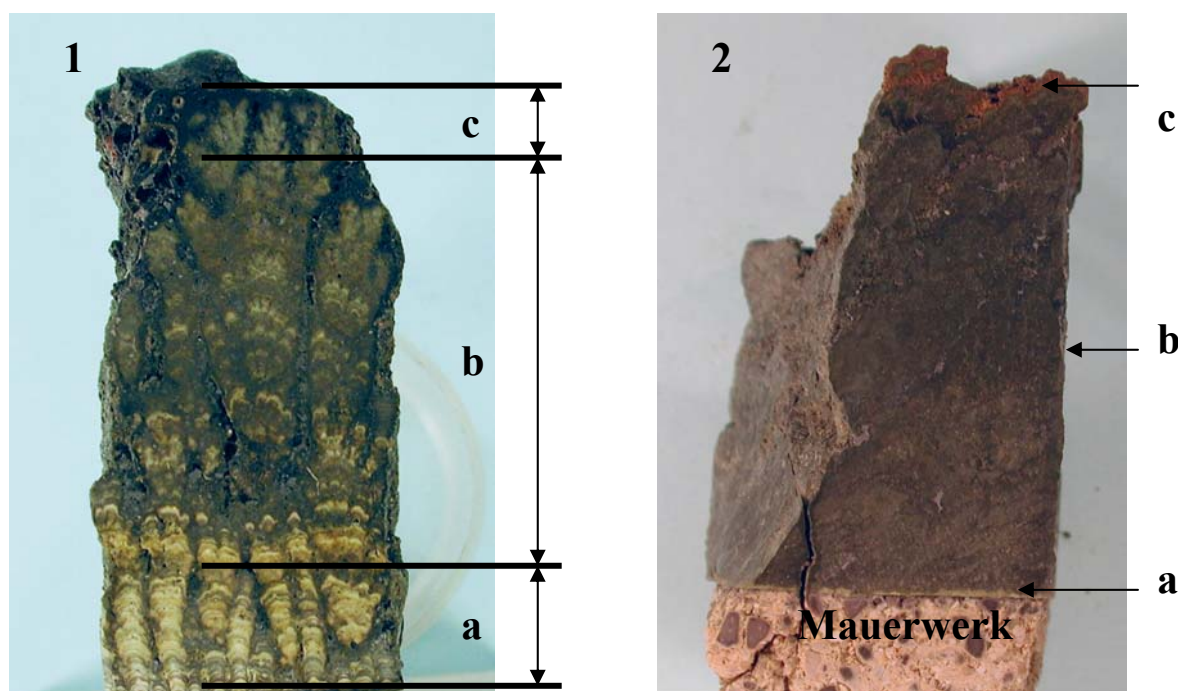
**Bild 73a und b:** Anschliffbilder der Probe aus dem Übergangsbereich;  
Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1



Die Schliffbilder lassen erkennen, dass fast keine Feinkornpartikel am Aufbau im Übergangsbereich beteiligt sind ( s. Bild 73a und b ). Chemisch und röntgenographisch sind nur ZnO und Pb nachweisbar. Im Gegensatz zu Proben von der Ofenwand zeigen die Ansätze von den anderen Stellen anschaulich, dass die Staubpartikeln keine entscheidende Rolle beim Ansatzwachstum spielen.

#### 8.4. Die Ergebnisse der chemischen und der röntgenographischen Untersuchungen der Schichten der Ansatzproben

Während die ersten Proben aus dem IS-Ofen ohne weitere Aufteilung zur chemischen Analyse kamen, wurden die anderen Ansätze in drei Zonen aufgeteilt. Hierdurch können Rückschlüsse auf die Entstehung der Ansätze gezogen werden. Bild 74 zeigt den Aufbau der Ansätze, die aus dem Übergangsbereich und von der Glockenoberfläche, wo die Bedingungen für Ansatzentstehung und Wachstum denen an der Ofendecke entsprechen, entnommen wurden.



**Bild 74:** Einteilung der Ansatzschliffe in die Zonen a, b und c; 1 – Glockenoberfläche, 2 – Übergang

Diese schichtförmige Struktur der Ansätze wurde nahezu an allen Stellen im IS-Ofen wiederholt festgestellt. Kennzeichnend ist der Aufbau aus drei unterschiedlichen Schichten,

die in ihrer Zusammensetzung unscharf gegeneinander abgegrenzt sind. Nach den optischen Einschätzungen kann man die aus der Anlage gebrochenen Proben in Zonen aufteilen:

- a) kalte Zone, die am Mauerwerk anlag
- b) mittlere Zone, die sich daran anschließt und ungefähr das Mittelteil des Ausbruchs umfasst
- c) heißeste Zone, die mit herabfallender Beschickung in Berührung stand

Jede Schicht weist eine andere Farbe auf. Die erste ist hell-gelb, die zweite grün-grau, die dritte schwarz. Die Dicke jeder Zone ist sehr unterschiedlich. Sie hängt von der Probenahmestelle ab. An Hand der Beobachtungen wurde nachgewiesen, dass die Ansätze vorwiegend aus der mittleren Schicht bestehen. Die kalte und die heißeste Zonen sind im Verhältnis dazu nur dünne „Schalen“ am Ofeninnern und auf der Ansatzoberfläche.

In der Tabelle 7 ist die chemische Zusammensetzung der einzelnen Zonen gezeigt. Die entnommenen Proben wurden im chemischen Labor der TU Bergakademie Freiberg und der MIM Hüttenwerke Duisburg untersucht.

Weil der Aufbau eines Ansatzes zwangsläufig von der Ofenwand ausgeht, wurden Untersuchungen mit der ersten Zone angefangen, um Hinweise über den Beginn der Ansatzbildung zu erhalten. Die erste gelbe Schicht der beobachteten Ansätze entstand durch Kondensation eines Teiles des gasförmigen Zink bzw. Zinkoxides am „kalten“ Mauerwerk.

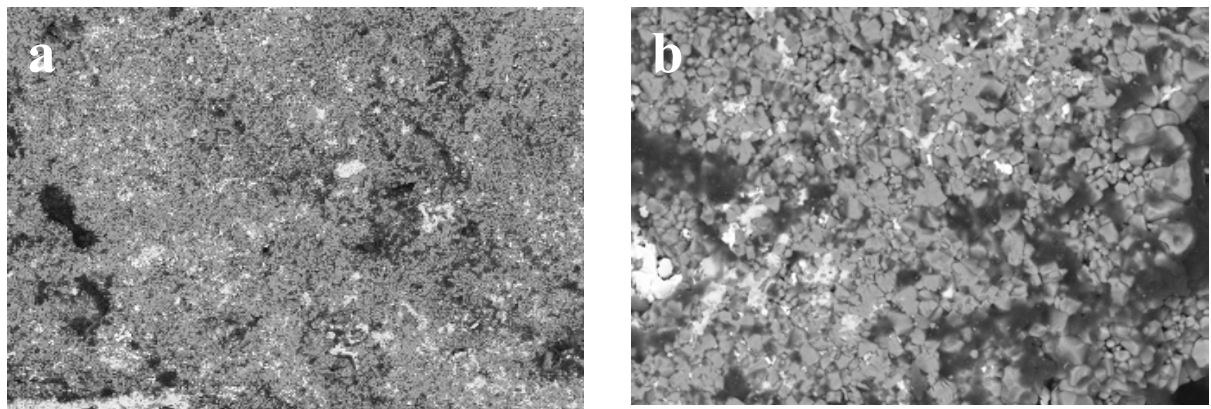
Elemente	Probezonen		
	a	b	c
<b>Zn</b>	76,06	75,47	61,97
<b>Pb</b>	9,12	9,34	3,6
<b>SiO<sub>2</sub></b>	0,6	1,37	3,28
<b>Fe</b>	0,48	0,64	10,97
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,03	0,02	0,22
<b>S</b>	0,24	0,21	1,8
<b>Cu</b>	0,16	0,2	1,69
<b>Al</b>	0,26	2,42	1,2
<b>Ca</b>	0,9	1,55	2,57

**Tabelle 7:** Chemische Zusammensetzung der Zonen a, b, c der von der Glockenoberfläche ausgebrochenen Probe

Nach dem Entstehen einer ersten Schale auf dem Mauerwerk bilden sich die Ansätze aus Zinkoxid weiter aus. Eine Anhaftung von Partikeln der Beschickung oder von Staub aus dem Gasstrom an den Wänden wird vorausgesetzt.

In der Röntgenphasenanalyse wurde nur ZnO gefunden. Metallisches Blei und die anderen Phasen wurden in der kalten Zone nicht nachgewiesen.

Die elektronenmikroskopischen Bilder 75 zeigen, dass poröse Schichten mit dem feinkörnigen Gefüge am Anfang des Ansatzwachstums entstehen. In Anschliffen der Proben erkennt man die Bleitropfchen, die sich zwischen Zinkoxidkristallen befinden. Die gleichen Erscheinungen traten während der Untersuchungen der Poren von der Glockenoberfläche und aus dem Übergangsbereich auf.



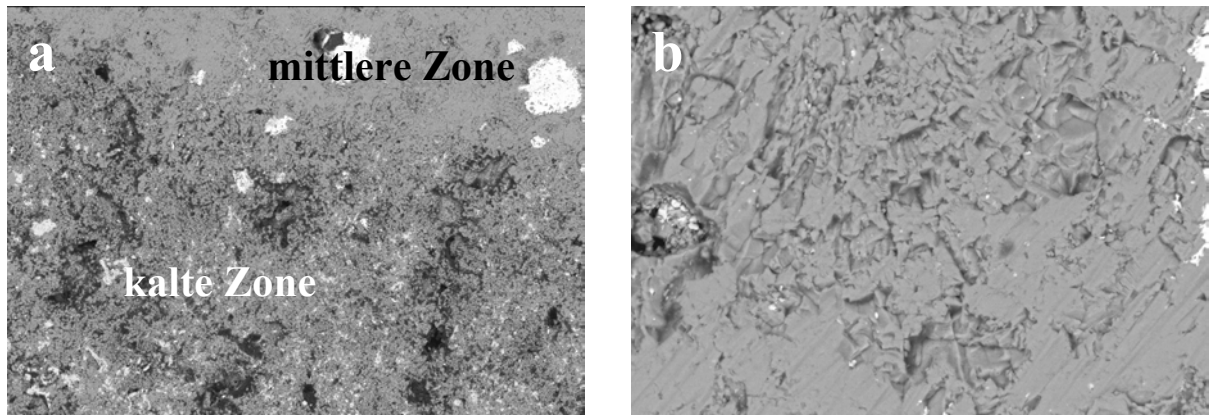
**Bild 75a und b:** Anschliffbilder der kalten Zone der Probe;

Vergrößerung a – 500:1, b – 3500:1

Im nächsten Schritt nehmen kleine Pb und ZnO sowie Staubpartikel am Ansatzaufbau teil. Diese können sowohl als Abrieb aus der Beschickung als auch aus den Abgasen kommen. Der Gehalt von Zinkoxid ist in der Zone 1 und 2 fast gleich und beträgt bis zu 75 %. Das aus dem Kondensator versprühte und aus der Möllersäule mit dem Gasstrom ausgetragene Blei liegt in zahlreichen Poren metallisch vor. Wie beim Zink unterscheiden sich auch die Bleigehalte ( über 9 % ) in den beiden Schichten kaum.

Durch Röntgenphasenanalyse wurde viel Zinkoxid und geringe Mengen an metallischem Blei festgestellt. In dieser Zone lagen fast 98 % ZnO vor. Der Bleigehalt betrug rund 2 %. In den beiden Schichten wurde kein metallisches Zink nachgewiesen. Andere Phasen und Elemente wurden nicht ermittelt.

Die Form der gebildeten Zinkoxidschicht unterscheidet sich in der mittleren Zone sehr von der in der kalten Zone. Aus den Schliffbildern 76a und b geht eindeutig hervor, dass die Porosität in dieser Schicht stark abnimmt. Zinkoxidkristalle bilden ein sehr enges Gefüge. Dadurch ändert sich die Farbe der Zone. Man kann eine raue Schliffoberfläche der mittleren Zone beobachten. Auf der REM-Aufnahme sind die Bleikörner zu erkennen ( s. Bild 76a ).



**Bild 76a und b:** Anschliffbilder der mittleren Zone der Probe;

Vergrößerung a – 500:1, b – 3500:1

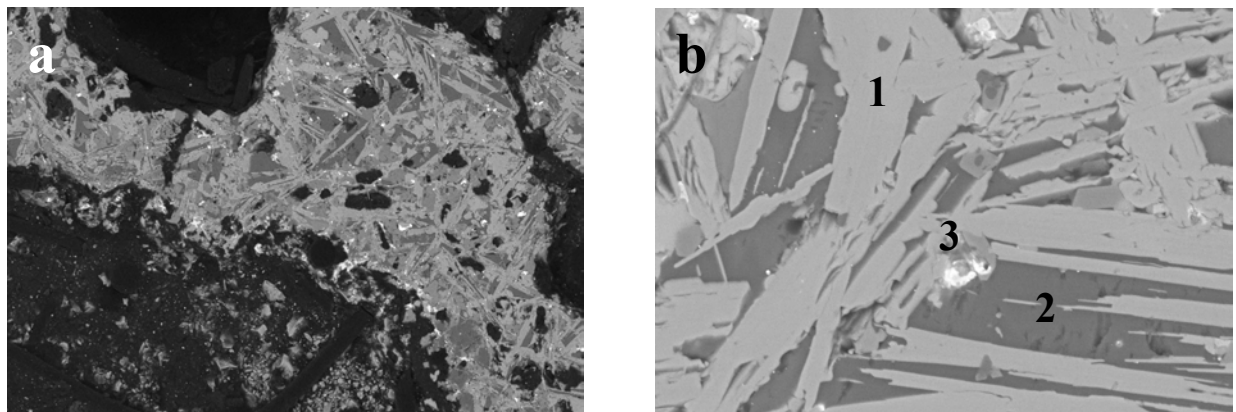
Dadurch entsteht die Voraussetzung, dass Zinkoxidpartikel an der Vorderwand haften und Ansätze bilden können. Im Übergang wurden größere Ablagerungen festgestellt, weil sich in diesem Abschnitt die meisten aus dem Kondensator ausgetragenen Bleitropfchen sammeln. Ihr Anteil in den anderen Bereichen der Anlage ist deutlich niedriger, deswegen sind die Ausmaße der Ansatzbildung an den Stellen, welche für die Bleitropfchen aus dem Kondensator unerreichbar sind, geringer, z.B. die Fläche um den Austrittsbereich blieb ansatzfrei. Bild 76a zeigt auch die Grenze zwischen der lockeren kalten Zone und der kompakt gebildeten mittleren Schicht.

In der heißesten Zone des Ansatzes wurde mit ca. 60 % Zn fast 15 % weniger festgestellt als in den anderen Schalen. CaO hat sich besonders stark in dieser oberen Schicht ( bis zu 2,57 % ) angereicht. Der SiO<sub>2</sub>-Gehalt stieg ( von 0,6 % auf 3,3 % ) in Richtung Ansatzoberfläche. Eisen wurde nach der chemischen Analyse in großen Mengen ( über 10 % ) in diesem scharf begrenzten Bereich gefunden. Das Eisenoxid lagert sich hauptsächlich hier ab. An der Ansatzoberfläche lagen solche Schichten, die lediglich aus Zink-, Eisen- und Calciumoxiden bestanden.

Diese Feststellung lässt sich wie folgt erklären: Während des Herunterfahrens des Ofen treten höhere Temperaturen als sonst auf. Die Wandschutzschicht wird teilweise oder komplett geschmolzen. Dadurch kommt es zur Veränderung der Ansatzzusammensetzung an der Oberfläche und es erfolgt die Anreicherung an Eisen- und Calciumoxiden, die mit der Beschickung in den Ofen eingebracht werden. Diese Erscheinung passiert nur an der Ansatzoberfläche und die Schichtdicke beträgt max. 10 mm.

Außer Zinkoxid und metallischem Blei wurden mittels Röntgenphasenanalyse noch andere Phasen festgestellt, die in dieser Zone am Aufbau beteiligt waren: z.B. Eisen, das in Oxidform als Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> vorliegt, und Calcium, das in der heißesten Schicht als CaO gefunden wurde.

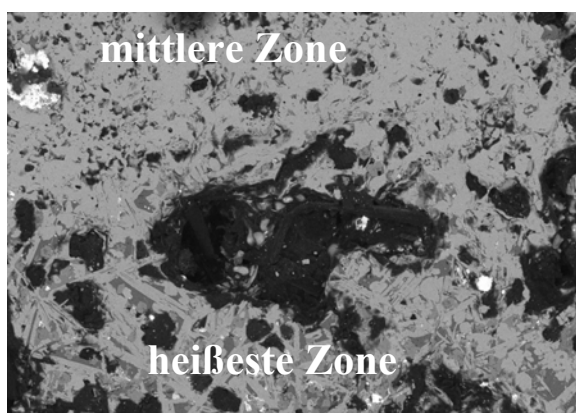
Außerdem wurde oxidisches Blei nachgewiesen. Die aus dem Kondensator stammenden Bleitropfchen waren mit einer Schale aus Bleioxid bedeckt.



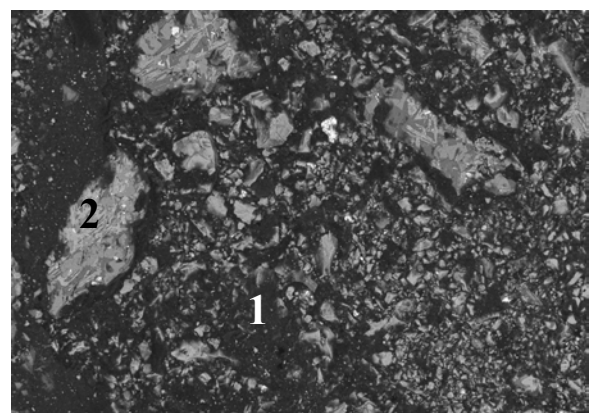
**Bild 77a und b:** Anschliffbilder der heißesten Zone der Probe;

Vergrößerung a – 500:1, b – 3500:1

Auf den Bildern 77a und b kann man die heißeste Ansatzzone sehen, die ein Ergebnis der Ofenstilllegungsprozedur beim Runterfahren ist. In dieser Schicht haben sich die Elemente wie Eisen und Calcium in oxidischer Form angereichert. Die Zone besitzt eine nadelförmige Struktur. Die hellen Nadeln ( 1 ) sind eine Phase aus Zink- und Eisenoxiden. Nach der Analyse betrug der Eisengehalt ca. 35 %. Die Zinkkonzentration lag in dieser Phase bei 20 %. Der dunklere Hintergrund ( 2 ) besteht vorwiegend aus der Mischung von  $\text{CaO}$ ,  $\text{ZnO}$  und  $\text{SiO}_2$ . Der Calciumoxidgehalt wurde in dieser Phase in einer Menge von 22 % gefunden. Die Siliziumoxidkonzentration lag bei rund 15 %. Der Rest des Ansatzes besteht hauptsächlich aus Zinkoxid. Außerdem kann man die eingelagerten Bleikörner ( 3 ) erkennen.



**Bild 78:** Übergang zwischen der mittleren und heißesten Zonen



**Bild 79:** Anschliffbild der Porenstruktur aus der heißesten Zone

Auf dem Bild 78 ist der Übergang zwischen der mittleren und heißesten Zone zu beobachten. Die Schicht ist stark porös. Bei dieser Probe treten größere Hohlräume auf, die beim Abschmelzen des Ansatzes entstanden sind. Auf dem Schliffbild 79 ist die Porenstruktur zu sehen. Die elektronenmikroskopische Analyse zeigt, dass ebenfalls viele schwarze Feinkornpartikel am Aufbau beteiligt sind. Neben ZnO sind auch mechanisch mitgerissene Kohlenstoffteilchen in den Poren zu beobachten. Der schwarze Hintergrund ( 1 ) ist Kohlenstoff mit ZnO ( s. Bild 79 ). Die hellen Gebiete ( 2 ) bestehen aus einer Zink-, Eisen- und Calciumoxidmischung und entsprechen der Struktur dieser Schicht. Ergänzend wird hier noch darauf hingewiesen, dass die heißeste Zone sehr dünn ist und die obere Ansatzschale bildet. Mit den elektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden die auf Grund der chemischen Zusammensetzung und der Phasenanalyse getroffenen Feststellungen bestätigt.

Wie schon erwähnt, wachsen die größten Ansätze an der unteren Kante des Austrittes. Aus den Ergebnissen der im Ofenmodell aufgenommenen Strömungsprofile ( s. Kapitel 6.3.4. ) lässt sich diese Erscheinung folgendermaßen erklären. Aufgrund der Einstellung der Düsen strömen die aus dem Schachtinneren aufsteigenden „kalten“ Ofengase ( 850 – 900 °C ) störungsfrei um die untere Austrittskante in den Übergangsbereich ohne vom Gichtwind abgebremst zu werden ( s. Bild 50, Seite 81 ). Als Folge davon wird dieser Abschnitt zusätzlich abgekühlt, d.h. deutlich mehr Zink kann bei dieser Temperatur reoxidieren, was die thermodynamischen Berechnungen anschaulich beweisen ( s. Bild 54, Seite 87 ). Auf der anderen Seite geht die Sekundärluft bei dieser Einstellung der Düsen von oben in den Abgaskanal ( s. Bild 48, Seite 79 ), d.h. die aus dem Kondensator versprühten Bleitropfchen werden dabei vom Gichtwind ineffektiv im unteren Bereich des Überganges abgebremst. Aus diesem Grund gelangen sie bis an die untere Kante des Austrittes. Aus dem Zusammenwirken von beiden Faktoren ( Abkühlung durch die „kalten“ Ofengase und Anwesenheit des Bleis ) ergeben sich die Bedingungen, unter denen an dieser Stelle die Ansätze schnell wachsen können.

Weiterhin ist zu betonen, dass die Position der Ansätze in der IS-Anlage darauf hindeutet, dass die Ansatzbildung hauptsächlich von Blei aus dem Kondensator initiiert wird. Das Metall wird am Mauerwerk von 500 auf 1000 °C erwärmt, d.h. es bleibt doch flüssig. Die aus dem Kondensator stammenden Bleieinschlüsse weisen eine Kugelform unterschiedlicher Größe auf. Ihr Durchmesser liegt im Bereich zwischen 0,3 mm und 5 mm. Der nach der folgenden Formel  $d_m = \sum (d_i / \Delta_i)$  berechnete mittlere Durchmesser beträgt 1,8 mm. Dabei ist  $d$  der Bleikugeldurchmesser und  $\Delta$  entspricht der Anzahl von Bleieinschlüssen mit dem Durchmesser  $d$ . Daraus folgt, dass der Anteil der von den Bleieinschlüssen belegten

Oberfläche bei rund 2 % liegt. Auf Grund der Konstruktion schlagen sich die Bleitropfchen an den Wänden nieder und bleiben dort haften. Obwohl die Bleieinschlüsse nur noch ca. 2 % der gesamten Oberfläche belegen, sind sie auf dem gesamten Mauerwerk verteilt. Dadurch entstehen die Bedingungen, unter denen sich die Zinkoxidpartikel am Mauerwerk niederschlagen und die Ansätze als Hauptbestandteil aufbauen können. Die Bleieinschlüsse wirken dabei wie ein „Kleber“, unter dessen Anwesenheit das ZnO am Mauerwerk haften bleiben kann.

Im Inneren des Ofens verursacht der mitgerissene Staub ebenfalls die Ansatzbildung. Die von diesem Abschnitt stammenden Ansatzproben weisen einen hohen Anteil an den Partikeln auf, welche durch Abrieb der Beschickung oder durch den Austrag aus dem Schacht an das Mauerwerk gelangen und sich niederschlagen können. Dadurch entstehen die Bedingungen, unter denen die rückoxidierten Zinkoxidpartikel an der Wand haften bleiben und dadurch die Ansatzschicht aufbauen.

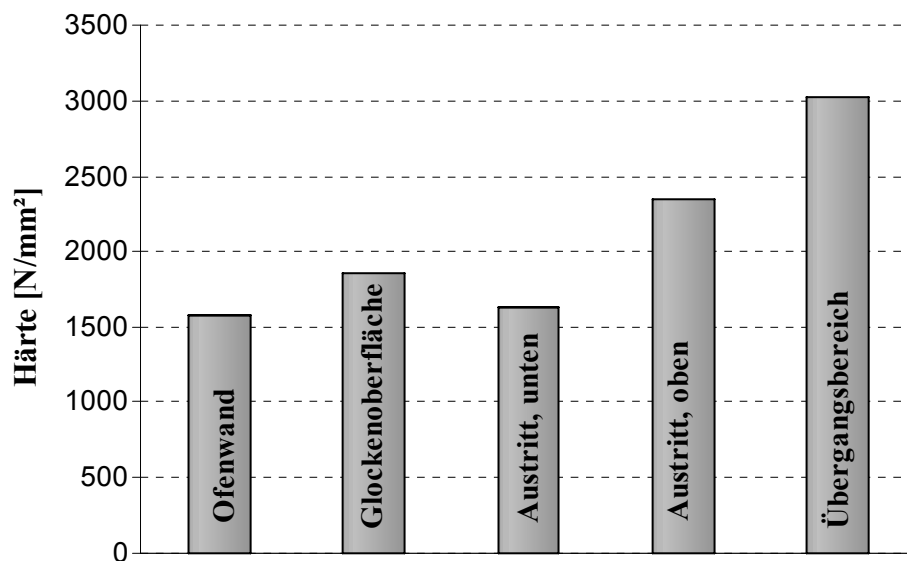
Aus den Strömungsbildern 37, 40 und 41 ( s. Kapitel 6.3.3. ) geht deutlich hervor, dass mit der Zunahme des Gichtwindvolumens die Geschwindigkeit im Oberofen wächst. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die aus dem Kondensator versprühten Bleitropfchen von der kräftigeren Abgasströmung schon im Übergangsbereich abgebremst werden können. Durch die Erhöhung der Geschwindigkeit der Sekundärluft sollen sie den Ofen nicht erreichen und im Übergangsbereich an den Wänden nur zum Teil haften bleiben, weil aufgrund der kräftigen Strömung die Bleieinschlüsse in den Kondensator zurück gedrückt werden. An Hand folgender Aussagen ist eine Verringerung der Ansatzbildung zu erwarten: Durch die veränderten Strömungsverhältnisse bzw. die erhöhten Geschwindigkeiten schlägt sich weniger Kondensatorblei an den Wänden des Ofens und im Übergangsbereich nieder. Als Ergebnis entsteht eine Voraussetzung zur Reduzierung der Ansatzbildung in diesen Abschnitten der Anlage, weil das Blei wesentlich für die Entstehung der Ansätze verantwortlich ist. ( s. Kapitel 8.3. ).

## **8.5. Die Ergebnisse der Härtemessungen**

Das Problem der Ansatzbildung wirft noch eine wichtige Frage auf, und zwar wie groß ist die Härte der Ansatzschicht und kann man daraus eine Abhängigkeit zwischen dem Aufbau der Ansätze und den Strömungsbedingungen ableiten.

Die Härtemessungen wurden folgendermaßen durchgeführt: Ein pyramidenförmiger Körper ( Vickersdiamant ) wurde in die geschliffenen Proben eingedrückt. Die Zeit für die Krafteinbringung betrug insgesamt 14 s. Jede Messung wurde 7 mal wiederholt, um

reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Daraus resultierend wurde die mittlere Härte berechnet. Die Ergebnisse sind auf dem Bild 80 aufgetragen.



**Bild 80:** Die mittlere Härte der Proben

Die Messungen ergaben eine wechselnde Härte der Proben, welche in Abhängigkeit von der Ansatzstelle der haftenden Schichten steht. Dies erklärt sich aus den Bedingungen für das Entstehen und das Wachstum der Ansätze. Aufgrund der Querschnittsverengung verändert sich die Geschwindigkeit der Gasströmung steigend im Ofen von unten nach oben. Dadurch ergibt sich eine unterschiedliche Verteilung der Strömungsenergie in der Anlage. An Hand der Härtewerte kann man feststellen, dass die Strömungsbedingungen im Ofen einen deutlichen Einfluss auf die Ansatzerscheinungen haben. Hier gilt die Proportionalität, dass die Ansätze um so fester werden, je größer die Gasströmung bei ihrer Bildung sind. Die schnelleren Geschwindigkeiten verursachen eine höhere Anpresskraft. Der Ansatz wird um so fester, je intensiver die Bestandteile an der Wand durch die Gasströmung aufprallen können. Dadurch entstehen unterschiedliche Wachstumsbedingungen der Ansätze. Aus diesem Grund besitzen die Proben unterschiedliche Härte und Struktur.

Lockere und voluminöse Ansätze entstehen im strömungsarmen Bereich an der Glockenoberfläche. Die dort abgelagerten Schichten besitzen eine geringere Härte. Ihre Beseitigung stellt kein großes Problem dar und ist weniger zeitaufwendig ( einige Minuten ). Im Gegensatz dazu bilden sich feste und porenfreie Schichten im Übergangsbereich aus, wo die hohen Gasgeschwindigkeiten herrschen. Diese Ablagerungen nehmen auf Grund ihrer Härte viel Zeit ( mehrere Stunden ) für die Entfernung in Anspruch.



## 8.6. Berechnung der Materialverluste durch Ansatzbildung

An Hand der Ergebnisse der Analysen und der visuellen Beobachtungen der Ansätze ist die Berechnung der Ausmaße der Ansatzbildung näherungsweise möglich. Daraus kann man auch die damit verbundenen Metallverluste ( Blei und Zink ) bestimmen.

Die Ansätze bilden einen festen porösen Überzug am gesamten Mauerwerk des Oberofens und des Übergangsbereichs. Je nach dem Ofenabschnitt unterscheidet sich die Dicke der Ansatzschicht. Die größten Ansätze wurden an der unteren Kante des Ofenaustrittes festgestellt ( bis zu 800 mm ). Im Übergang liegt die Dicke der Ansatzschicht zwischen 200 mm an den Wänden und 400 mm am Boden. An manchen Stellen im Innenraum des Ofens ( Mauerwerk um die Düsen ) um wurden keine Ansätze festgestellt, im überwiegenden Teil des Ofens erreichte die Ansatzschicht eine durchschnittliche Dicke von bis zu 100 mm.

Aus den von MHD zur Verfügung gestellten Zeichnungen der IS-Anlage kann die innere Oberofen- und Übergangsoberfläche berechnet werden. Mit Hilfe dieser Werte kann der Umfang der Ansätze bestimmt werden.

Die Oberfläche des Übergangsbereichs beträgt rund 50 m<sup>2</sup>, daraus ergibt sich ein Ansatzvolumen bei ca. 10 m<sup>3</sup>. Die durchschnittliche Ansatzdicke ist im Ofeninneren ( Wände und Ofendecke ) deutlich niedriger. Das Ansatzvolumen liegt damit bei ca. 2 m<sup>3</sup>. Die Ansatzdichte wurde mit ca. 6,4 g/cm<sup>3</sup> ermittelt. Daraus resultiert eine Gesamtansatzmasse von rund 78 t nach 6 Tagen. Das sind umgerechnet 12,8 t Ansatzwachstum pro Tag. Der mittlere Zinkgehalt in den Ansatzproben ist bekannt, er liegt bei 65 %. Daraus folgt, dass rund 50 t Zn am Ansatzwachstum in 6 Tagen beteiligt sind, d.h. 8,3 t. Zn pro Tag. Wenn man diese Zahl mit der Tageszinkproduktion vergleicht, erkennt man, dass rund 2,5 % des gesamten Zinks in den Ansätzen gebunden sind. Dieser Wert liegt im Vergleich mit den Literaturangaben [ 30 ] ( ≈1 % Zn ) deutlich höher. Außerdem beinhalten die Ansätze nach 6 Tagen rund 6 t Blei.

Die vollständige Beseitigung der Ansätze bereitet mit den gegenwärtig angewendeten Methoden große Schwierigkeiten, ein Teil davon lässt sich nicht entfernen und verbleibt im Ofen. Aus diesem Grund ist der freie Querschnitt des Ofens kleiner, als in Zeichnung angegeben. Außerdem wird der Durchströmungsbereich während des Ofenbetriebes wegen des Ansatzwachstums ständig enger.

Die in der Ansatzschicht vorliegenden Metalle gehen nicht verloren. Sie werden im Ofen wieder eingesetzt. Die herausgebrochenen Ansätze werden gesammelt, zerkleinert und zusammen mit den anderen Materialien erneut beschickt. Ihre Beseitigung, Aufarbeitung und Zerschmelzen nehmen jedoch viel Zeit und Geld in Anspruch.

Aus den durchgeführten Berechnungen geht deutlich hervor, dass die Ansätze nach 6 Tagen 6 t Blei beinhalten. Dies entspricht 12 g pro Sekunde.

### 8.7. Berechnung der Wärmeverluste durch Bleiaustrag aus dem Kondensator

Aus den Berechnungen geht hervor, dass pro Sekunde durchschnittlich 12 g/s Pb aus dem Kondensator in den Ofen gelangen, falls alles Pb in den Ansätzen aus dem Kondensator stammt. Von Anfang an wurde angenommen, dass die Temperatur der Bleieinschlüsse am Mauerwerk mit der Abgastemperatur übereinstimmt. Die aus dem Kondensator versprühten Bleitropfchen weisen im Vergleich zu den Ofengasen eine deutlich niedrigere Temperatur ( 500 °C ) auf. Das Kondensatorblei gelangt hauptsächlich auf den Boden, an die Decke und die Wände des Übergangsbereiches. Manche Tropfchen reichen bis zum Ofenaustritt hinein. Als Ergebnis ist das Kondensatorblei auf einer Oberfläche von ca. 27 m<sup>2</sup> verteilt. Daraus folgt, dass durchschnittlich 0,45 g Pb pro Sekunde am Ansatzwachstum je Quadratmeter teilnehmen. Die Bleitropfchen kühlen lokal die Wände ab und tragen dadurch zur Ansatzbildung bei. Um diese Vermutung zu überprüfen, kann man die Wärmeverluste für die Erwärmung der Bleieinschlüsse ausrechnen. Es handelt sich um die Wärme, welche für die Erwärmung der 0,45 g Pb von 500 °C auf 1000 °C gebraucht wird [ 79 ]

$$Q_{Pb} = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (35)$$

$Q_{Pb}$  – Wärmemenge in J,

$m$  – Masse des Bleis in kg,

$c_p$  – Spezifische isobare Wärme in J/(kg\*K),

$\Delta T$  – Temperaturdifferenz in K.

Die Masse ist uns schon bekannt und  $c_p$  für Blei bei 500 °C beträgt 210 J/(kg\*K) [ 80 ]. Daraus kann die Wärmemenge  $Q_{Pb}$  berechnet werden [ 81 ].

$$Q_{Pb} = m \cdot c_p \cdot \Delta T = 0,00045 \cdot 210 \cdot 500 \approx 47 J$$

Daraus folgt, dass die Wärmeverluste  $\dot{Q}_{Pb}$  für die Erhitzung des Kondensatorbleis pro Quadratmeter pro Sekunde 47 W betragen.

Gleichzeitig werden die Wände von den heißen Ofengasen umströmt und dadurch erwärmt. Aus dem Wert der zugeführten und der von Blei entnommene Wärme können Rückschlüsse über den Einfluss des Bleis gezogen werden [ 81 ].

$$\dot{Q}_g = \alpha \cdot A_w \cdot (T_g - T_{wand}) \quad (36)$$

$\dot{Q}_g$  – Wärmestrom in W,

$\alpha$  – Wärmeübergangskoeffizient in W/(m<sup>2</sup>\*K),

$A_w$  – Oberfläche in m<sup>2</sup>,

$T_g$  – Temperatur der Gase in K,

$T_{wand}$  – Wandtemperatur in K.

Um den Wärmestrom pro Quadratmeter zu berechnen, muss zuerst der Wärmeübergangskoeffizient bestimmt werden. Man kann sich die Strömungsverhältnisse an der Wand wie die Umströmung einer ebenen Platte vorstellen. Aus diesem Grund lässt sich die Nusselt-Zahl nach der folgenden Formel berechnen [ 81 ]

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (37)$$

$\lambda$  – Wärmeleitfähigkeit in W/(m\*K),

$L$  – Länge in m,

$Re$  – Reynolds-Zahl,

$Pr$  – Prandtl-Zahl.

Die Prandtl-Zahl für die gegebene Zusammensetzung der Gasphase bei 1000 °C liegt bei 0,7326 [ 80 ]. Die Wärmeleitfähigkeit ist gleich 0,0748 W/(m\*K) [ 80 ].

$$Nu = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} = 276,4$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{L} = 20,67 W / (m^2 * K)$$

$$\dot{Q}_g = 4134 W$$

Der Wärmestrom für die Gasphase beträgt damit 4134 W. Daraus kann eine Differenz der beiden Wärme ausgerechnet werden, um den Beitrag des Kondensatorbleis zur Abkühlung der Wände des IS-Ofens.

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_{Pb} = 4087 \text{ W} \quad (39)$$

$\Delta \dot{Q}$  – Wärmedifferenz in W,

$\dot{Q}_g$  – Wärmestrom der Ofengase in W,

$\dot{Q}_{Pb}$  – Wärmeverluste durch Erhitzung des Kondensatorbleis in W.

Aufgrund der hohen Differenz der Wärmestromwerte für die Ofengase und das aus dem Kondensator versprühte Blei zeigt sehr deutlich, dass die aus dem Kondensator stammenden „kalten“ Bleitropfchen keinen Einfluss auf die Abkühlung der Wände ausüben. Diese kann hauptsächlich nur bei der Beschickung des Ofens passieren. Durch die Erwärmung der Bleieinschlüsse erfolgt eine geringfügige Wärmeentnahme, die von den die Wände umströmenden heißen Abgasen kompensiert wird. Die Bleieinschlüsse bilden im Ofen einen Belag, auf dem sich die ZnO-Partikel niederschlagen und haften bleiben können.

## **9. Nebelabscheidung**

Wie schon erwähnt wurde, stellt die verwendete Versuchsanlage ein sogenanntes „kaltes“ Modell dar. Die Strömungsprofile zeigen nur die Flächen und Gebiete, an denen die Möglichkeit zur Ansatzbildung besteht. Die Reaktionen, welche für das Ansatzwachstum verantwortlich sind, können nicht wiedergegeben werden. Um das Entstehen und die Ausbreitung der Ansätze an Hand des „kalten“ Modells darzustellen, wurde die Abscheidung der Nebelflüssigkeit an den Modellwänden untersucht.

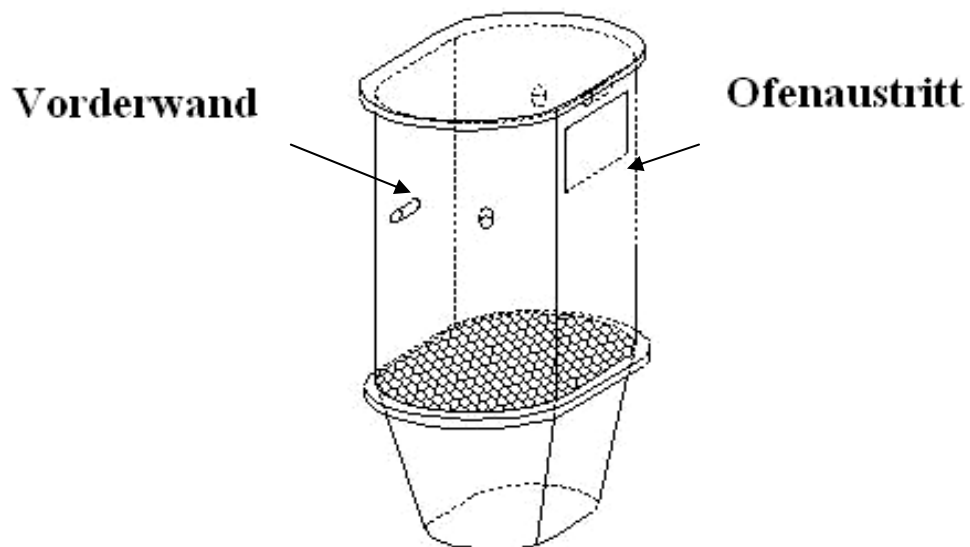
Zur Strömungssimulation wird der Nebel durch das Modell gesaugt. Während der langen Versuchsdauer ( bis zu 7 Stunden ) tritt eine geringfügige Kondensation der Nebelflüssigkeit an den Modellwänden auf. Es wurde bemerkt, dass die Einstellung der Gichtwinddüsen bzw. das Gichtwindvolumen diesen Vorgang beeinflussen. Solche Abscheidungen können die Stellen, an welchen die größten Tröpfchen der Nebelflüssigkeit entstanden sind, zeigen.

Diese Niederschläge an den Modellwänden wurden visuell untersucht und mit einer digitalen Kamera aufgenommen. Aus den visuellen Einschätzungen können Schlüsse über die Wirkung der Gichtwindzuführung infolge Kondensation der Nebelflüssigkeit gezogen werden. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Entstehungsorte der Ansätze im IS-Ofen zu und können auf das Original übertragen werden.

Zu diesem Zweck wurden zusätzliche Versuche zur Bestimmung der Auswirkung der Gichtwindzuführung auf die Kondensation der Nebelflüssigkeit durchgeführt. Um diese Erscheinungen kennenzulernen, wurde eine bestimmte Nebelmenge ( 80 % der Leistung des Nebelgerätes, was dem Nebelflüssigkeitsverbrauch von 65 ml/min entspricht ) während 30 Minuten durch das Modell gesaugt. Danach wurden die Nebelflüssigkeitsniederschläge visuell untersucht und fotografiert. Resultierend können Aussagen über die Wirkung verschiedener Düseneinstellungen und Gichtwindvolumina auf die Abscheidung der Nebelflüssigkeit im Modell bzw. über die Ansatzbildung im Originalofen getroffen werden.

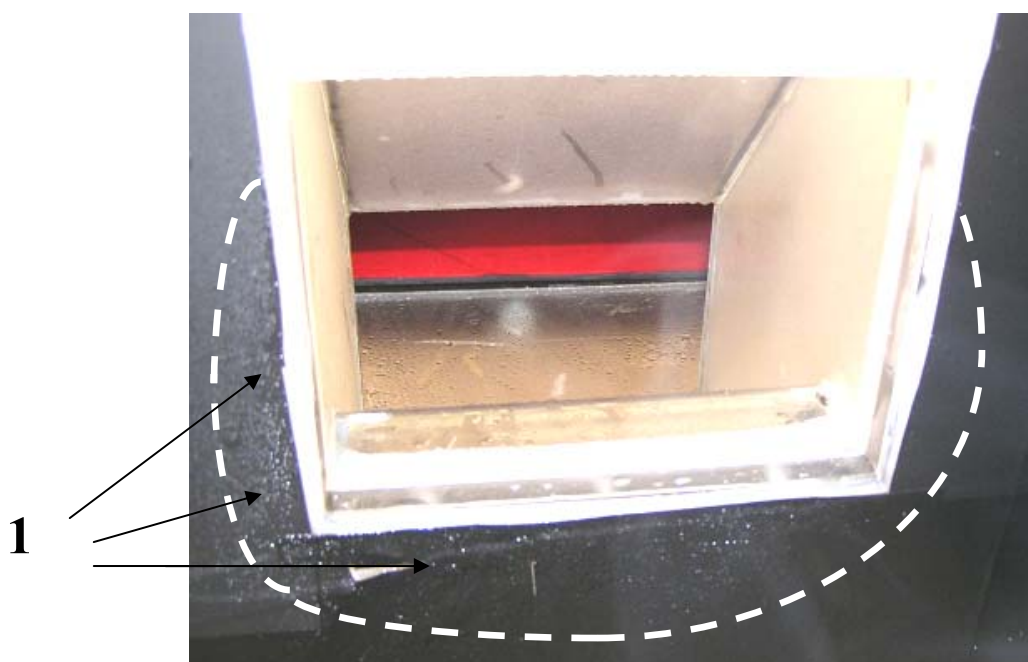
### **9.1. Nebelabscheidung im Modell**

Nach den visuellen Einschätzungen der aufgenommen Abscheidungen kann eine charakteristische Tendenz für alle Gichtwinddüseneinstellungen festgestellt werden. Die Kondensation tritt hauptsächlich am Austrittsbereich und an der Vorderwand des Modells auf ( s. Bild 81 ). Aus dem Bild 82 geht deutlich hervor, dass die größten Abscheidungen an der unteren Kante des Austritts liegen. Hier wurden die Niederschläge auch in Tröpfchenform ( die hellen Punkte auf Bild 82 (1) ) festgestellt. Manche davon sind unter der Wirkung der



**Bild 81:** Schematische Darstellung des Ofenmodells

Ofenströmung in den Übergang heruntergelaufen. Man sieht ihre Spuren, die sich in der Mitte der Kante befinden. Diese Erscheinung entspricht der Geschwindigkeitsverteilung im Modell, wo die höchsten Geschwindigkeiten an dieser Stelle gemessen wurden ( s. Kapitel 6 ). Die Seiten des Austrittes sind also auch mit den Tröpfchen bedeckt. Mit einer unterbrochenen Linie ist die Grenze der Abscheidungen dargestellt.



**Bild 82:** Abscheidung der Nebelflüssigkeit am Austrittsbereich des Modells

Das Bild 82 macht anschaulich, dass je näher die Tröpfchen zum Austritt liegen, desto größer ist ihr Durchmesser. Es ist zu erkennen, dass die obere Austrittskante niederschlagsfrei bleibt. An der Vorderwand entsteht im Gegenteil nur ein dünner Film, der sich fast über die gesamte Fläche des Modells erstreckt. Die obere Kante und die Wände bleiben niederschlagsfrei. Der Kondensatfilm an der Vorderwand und an der Ofendecke war sehr dünn. Die Bereiche um die Gichtwinddüsen waren nicht mit der Nebelflüssigkeit bedeckt. An der Modelldecke und um die Gichtwinddüsen entsteht nach 30 Minuten nur ein dünner Kondensatfilm, der kaum zu sehen ist. Eine Tröpfchenbildung wurde hier nach Versuchsende nicht festgestellt.

Das gesamte Bild der Abscheidung der Nebelflüssigkeit im Modell stimmt mit dem Originalofen, wo die größten Ansätze an der unteren Kante und an den Seiten des Ofenaustrittes gefunden wurden, überein ( s. Kapitel 8 ). Daraus besteht die Möglichkeit die Ansatzbildung mittels des „kalten“ Modells sichtbar machen.

## **9.2. Beschreibung der Abscheidungen bei verschiedenen Gichtwindvolumina**

Wie oben beschrieben, wurden erhebliche Niederschläge an der unteren Kante des Austrittes festgestellt. Aus diesem Grund wurde die Abscheidung der Nebelflüssigkeit an dieser Stelle in Abhängigkeit von der Gichtwindzuführung näher untersucht. Dabei wurde die Kondensation bei den geneigten ( Neigung  $10^\circ$  ) Position der Gichtwinddüsen fotografiert. Von besonderem Interesse war der Einfluß der Gichtwindvolumina auf diesen Vorgang.

Auf den Bildern 83a, b und c sind die Abscheidungen an der unteren Kante nach 30 Minuten dargestellt. Sie zeigen die Niederschläge zum Versuchsende, welche bei einer Neigung von  $10^\circ$  und dem Gichtwindvolumen von  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  (a),  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  (b) und  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  (c) aufgenommen wurden.

Die Aufnahmen zeigen die Unterschiede zwischen den untersuchten Einstellungen. Die Bilder können anschaulich erklären, wo und bei welcher Einstellung die stärkste Abscheidung stattgefunden hat. Bei  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  findet man die abgeschiedene Nebelflüssigkeit hauptsächlich an der unteren Kante und an den Seiten des Austrittes. Die anderen Teile des Modells bleiben kondensatfrei. Mit weiterer Zunahme des Gichtgasvolumenstroms erstrecken sich die Niederschläge fast über die gesamte Oberfläche der Hinterwand des Modells. Schon bei einem Gichtgasvolumenstrom von  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  wurde ein Teil der kondensierten Nebelflüssigkeit von der Strömung in den Übergangskanal verschoben, weil die Tröpfchen zu groß waren und an der unteren Kante des Austrittes nicht mehr haften konnten.

Man kann auch gut sehen, dass manche Tröpfchen unter der Wirkung der Schwerkraft ins Modellinnere abtropfen ( man kann ihre Spuren an der Wand erkennen Bild 83c (1) ). Das passiert im Originalofen nicht, weil die Ansätze eine festanhaftende Schicht am Mauerwerk bilden ( s. Kapitel 8.3. ). Bei einem Gichtgasvolumen von 28 m<sup>3</sup>/h entstehen die Abscheidungen der Nebelflüssigkeit sogar an der oberen Kante des Austrittes. Grundsätzlich ist festzustellen, dass ein Zusammenhang zwischen der Menge der Abscheidungen und der Gichtwindzuführung besteht. Mit der Zunahme vom Gichtwindvolumen ist eine Erhöhung der Abscheidung festzustellen. Die Tröpfchenmenge und ihre Durchmesser werden deutlich größer.

Diese Erscheinungen können folgendemmaßen erklärt werden: Das Modell wird mit Raumluft betrieben, als Gichtwind wurde jedoch Außenluft gesaugt, d.h. er weist eine deutlich niedrigere Temperatur auf. Aus diesem Grund wurde die untere Kante des Austrittes mit der Erhöhung der Gichtwindvolumina zusätzlich abgekühlt. Dies verursachte die Zunahme der Kondensation an den Stellen, wo



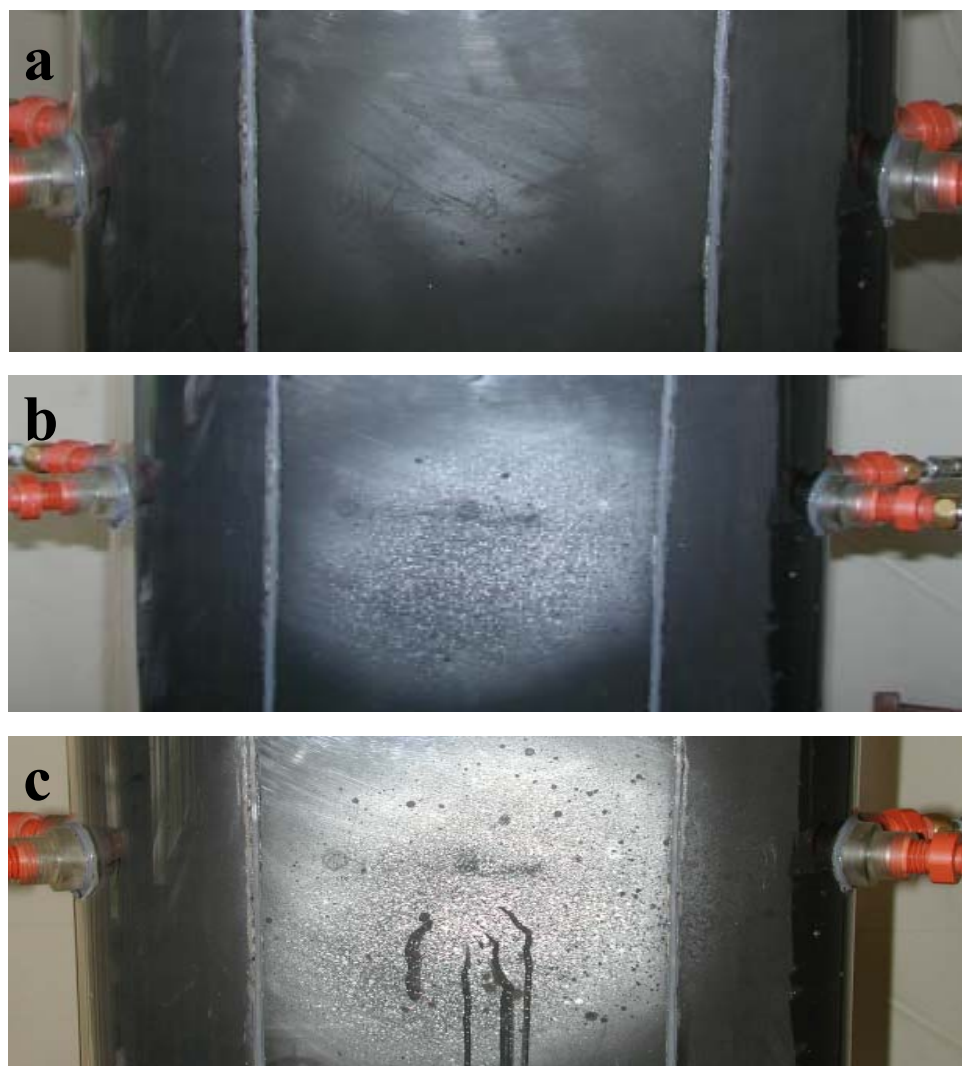
**Bilder 83a, b, c:** Die Abscheidungen der Nebelflüssigkeit an der unteren Kante des Austrittes bei verschiedenen Gichtwindvolumina; a - 20 m<sup>3</sup>/h, b - 25 m<sup>3</sup>/h, c - 28 m<sup>3</sup>/h



der Gichtwind mit den Modellwänden in Berührung kam. Dieselbe Erscheinung wäre also auch im Originalofen zu erwarten, wo das Gichtgas deutlich kälter ( 700-750 °C ) als die Oberofentemperatur ( rund 1000 °C ) ist. Aber auf der anderen Seite könnte die Erhöhung der Sekundärluftmenge auch zum Temperaturanstieg führen, weil nach den Berechnungen mit ChemSage mehr CO durch die Reaktion mit Sauerstoff zu CO<sub>2</sub> nachverbrannt wird ( s. Kapitel 7.2. ). Dadurch könnten die Wärmeverluste im Oberofen ausgeglichen werden.

### 9.3. Beschreibung der Abscheidungen an der Vorderwand des Modells

Nach der unteren Kante des Austrittes hat die größte Kondensation an der Vorderwand des Modells stattgefunden. Deshalb wurde diese Stelle näher hinsichtlich der Entwicklung der Niederschläge auf diesem Modellteil untersucht. Die folgenden Aufnahmen wurden bei einem Neigungswinkel der Gichtwindddüsen von 10° gemacht. Das Volumen des Gichtgases betrug dabei 25 m<sup>3</sup>/h.



**Bild 84a, b und c:** Entstehung und Ausbreitung der kondensierten Schicht bei 25 m<sup>3</sup>/h

Auf den Bildern 84a, b und c ist die Entstehung und die Ausbreitung der Kondensationschicht an der Vorderwand dargestellt. Aus Bild 84a kann man gut erkennen, dass der erste Abscheidungsleck aus der Nebelflüssigkeit an einer Stelle in der Mitte des Modells, wo sich die beiden Einlaufströmungen treffen, entsteht.

Im weiten Verlauf des Experimentes breitete sich dieser Fleck in alle Richtungen aus ( s. Bild 84b ). Nach 30 Minuten bedeckt die Schicht aus der kondensierten Nebelflüssigkeit fast die ganze Vorderwand des Modells. Im Zentrum dieses Feldes entstanden auch schon große Tropfen. Manche davon liefen unter der Wirkung der Schwerkraft und des Gichtwindes an der Wand herunter ( s. Bild 84c ).

Die Bahnen von herunterlaufenden Tröpfchen sind stark vom Gichtwindvolumenstrom abhängig. Das beweisen die Bilder 85a, b und c, auf denen solche Spuren gut zu erkennen sind. Um diesen Vorgang besser zu illustrieren, wurde der Nebel über eine längere Zeit ( ca. 60 Minuten ) durch das Modell gesaugt.

Man sieht sehr deutlich, dass die Bahnen mit der Zunahme des Volumens deutlich länger werden. Bei 20 m<sup>3</sup>/h laufen die Tröpfchen aus dem Zentrum des Abscheidungsgebietes fast senkrecht zum Boden herunter. Mit der Erhöhung des Gichtwindvolumens auf 25 m<sup>3</sup>/h und damit verbundener Vergrößerung der



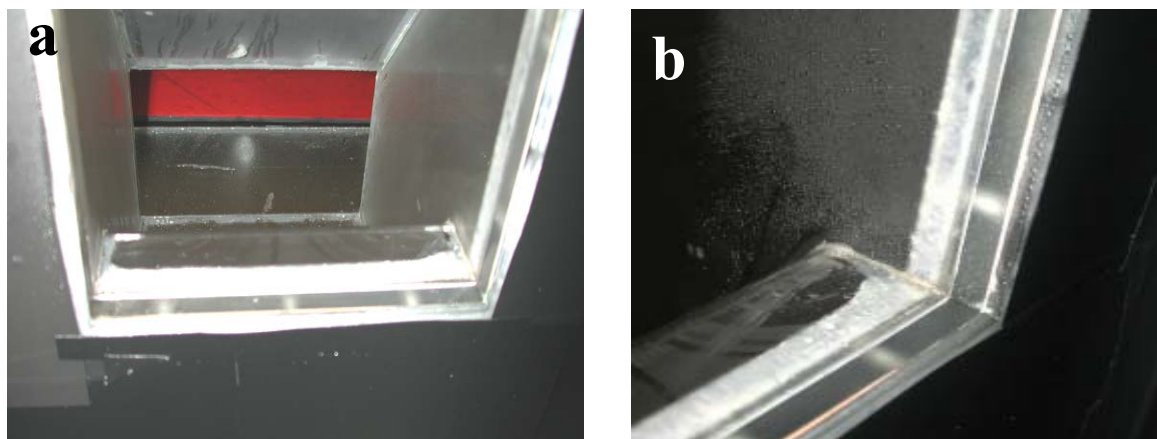
**Bild 85a, b, c:** Die Spuren der Tröpfchen der Nebelflüssigkeit; a - 20m<sup>3</sup>/h, b – 25m<sup>3</sup>/h, c – 28 m<sup>3</sup>/h

Gasgeschwindigkeit im Modellraum, bewegen sich die Tröpfchen anders. Sie beschreiben erst einen Bogen auf der Oberfläche der Vorderwand, um anschließend nach unten zu strömen. Die weitere Zunahme des Gichtgasvolumens verursacht die Verlängerung der Spuren der herunterlaufenden Tröpfchen, weil die Wirkung des Gichtwinds deutlich größer wird. Die kräftigen Einlaufströmungen lassen die kondensierte Nebelflüssigkeit nicht gleich nach unten laufen, sondern sie schleudern die Tröpfchen an die Seiten der Vorderwand. Dadurch entstanden im Modell diese charakteristischen vom Volumenstrom anhängigen Formationen. Die oben präsentierten Bilder beschreiben die Entstehung und die Ausbreitung der Kondensatschicht bei unterschiedlichen Gichtwindzuführungen. Jede Einstellung weist Besonderheiten auf, z.B. mit der Zunahme des Gichtwindvolumens läuft die Kondensation der Nebelflüssigkeit intensiver ab. Die erhöhte Menge des Gichtwindes beschleunigt diesen Vorgang und die Schicht breitet sich schneller aus.

Bei einer steilen Einstellung der Düsen ( Neigungswinkel  $20^\circ$  ) entsteht der erste Niederschlag tiefer im Schacht, d.h. die Position der Abscheidung an den Wänden hängt von der Neigung der Gichtwinddüsen ab.

#### **9.4. Beschreibung der Abscheidungen bei der kombinierten Einstellung der Gichtwinddüsen**

Die Abscheidung der Nebelflüssigkeit bei der kombinierten Einstellung der Gichtwinddüsen, d.h. die Sekundärluft wird mit Neigung von  $10^\circ$  und Volumen von  $25 \text{ m}^3/\text{h}$  in Richtung Vorderwand eingeblasen ( s. Kapitel 6.3.4. ), wurde extra untersucht, weil sie mit der Position der Düsen im Originalofen bei MHD übereinstimmt. Dadurch ist es möglich, die Ansatzbildung im Modellmasstab zu modellieren und teilweise zu erklären.



**Bild 86a und b:** Abscheidungen der Nebelflüssigkeit am Austrittsbereich; a Gesamtansicht, b – Austrittsecke

Wie in den Bildern 86a und 86b zu sehen ist, blieb die untere Kante des Austrittes nach 30 Minuten fast niederschlagsfrei. Auf keinen Fall folgt daraus, dass sich an dieser Stelle im Original keine Ansätze bilden werden. Ganz im Gegenteil, die aus dem Schacht austretenden Gase stehen nicht in Berührung mit der eingeblasenen Sekundärluft und strömen störungsfrei in den Übergangsbereich. Als Ergebnis werden die Tröpfchen der Nebelflüssigkeit von der unteren Kante des Austrittes in den Übergang verschoben.

Die Nebelflüssigkeitsabscheidungen sind nur an der Seite des Austrittes ( s. Bild 86b ) zu sehen, was der Strömungsverteilung im oberen Modellabschnitt bei der kombinierten GichtwinddüsenEinstellung entspricht.

Die Form der Abscheidung an der Vorderwand entspricht also auch der Position der Gichtwinddüsen. Dieser Modellbereich wird schnell von den „kalten“ Einlaufströmungen abgekühlt. Aus diesem Grund entsteht hier die kondensierte Schicht der Nebelflüssigkeit früher als bei den anderen Einstellungen der Düsen. Die Bahnen der heruntergelaufenen Tröpfchen stehen auch in direktem Zusammenhang mit der Art der Gichtwindzuführung. Durch das schräge Einblasen wird die kondensierte Nebelflüssigkeit nach allen Richtungen verschoben. Dies führt zur Entstehung der Niederschlagsformationen, die auf dem Bild 87 zu sehen sind.



**Bild 87:** Die Spuren der heruntergelaufenen Tröpfchen der Nebelflüssigkeit bei 25 m<sup>3</sup>/h

Der Gichtwind übt einen geringen Einfluss auf die Ofenströmung aus. Die vollständige Vermischung der Ofengase wird nicht erreicht. Daraus resultierend ergibt sich eine starke Ansatzbildung im Oberofen.



## **10. Fehlerbetrachtung**

### **10.1. Fehler infolge partieller Ähnlichkeit**

Eine Übertragung auf den Originalprozess erlaubt hinsichtlich der Ansatzbildung nur Aussagen über die Tendenz in Richtung Verbesserung oder Verschlechterung, jedoch keine quantitativen Aussagen. Eine direkte Übertragung ist nicht möglich, weil

- die Temperaturdifferenz zwischen den aus dem Ofen aufsteigenden Gasen und dem eingeblasenen Gichtwind nicht berücksichtigt wurde,
- der Einfluss der Beschickung und der Schüttung auf die Ofenströmung vernachlässigt wurde,
- die an den Wänden ständig wachsenden Ansätze außer Acht gelassen wurden,
- die zwischen den Ofengasen und der Schüttung ablaufenden Reaktionen im Modell nicht widergespiegelt werden konnten.

Weil die Abhängigkeiten der gemessenen Strömungsprofile von unterschiedlichen Parametern der Gichtwindzuführung erkennbar sind, ist von einer Aussagefähigkeit der erhaltenen Ergebnisse auszugehen. Für die praktische Ofenführung können dann zumindest Relationen abgeschätzt werden, die sich aus den Änderungen von einer oder mehreren Einflussgrößen ergeben.

Auf Grund der Erhaltung der das System charakterisierenden Re-Zahl sind im IS-Ofen prinzipiell vergleichbare Strömungsverhältnisse wie im Modell zu erwarten.

### **10.2. Fehlerabschätzung der Einflussgrößen**

Bei der messtechnischen Erfassung der physikalischen Größen ist immer während der Experimente mit Fehlern zu rechnen. Zur Einstellung des Gichtwindvolumenstromes diente ein Rotameter. Bei dessen Kalibrierung konnte im Bereich von 15 bis 28 m<sup>3</sup>/h ein zufälliger Fehler von 0,20 m<sup>3</sup>/h durch Ablesungenauigkeiten und Schwankungen im Luftvolumenstrom, festgestellt werden.

Die Düsen weisen fertigungsbedingt einen zufälligen Fehler in der Neigung auf. Dieser Fehler liegt in einer Größenordnung von ca. 0,5°.

### **10.3. Fehlerbetrachtung zu den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten**

Der Fehler bei Laser-Doppler-Geschwindigkeitsmessungen wird allgemein mit 2 % angegeben. Insbesondere bei hoher Turbulenz der Strömung steigt der Messfehler mit

Verringerung der Messwertzahlen stark an. So erhöht sich zum Beispiel bei dem Messfehler von 2 % bei 2000 Stützwerten auf 6 % bei 200 Stützwerten.

Die Verwertbarkeit der erhaltenen Ergebnisse hängt von der Größe der systematischen und der zufälligen Fehler der Laser-Doppler-Anemometrie ab. Sie sind alle in der Tabelle 8 aufgelistet:

<b>Fehler</b>	<b>Ursachen der Fehler</b>
<b>systematische</b>	Ungenauere Treiberfrequenzen der Modulatoren
	Fehler im Abstand der Strahlen
	Geometrische Fehler der Frontlinse
	Brechung der Laserstrahlen an der Grenze Luft/Polyacrylmodellwand
	Überschwingen von Verstärker und Filter
<b>zufällige</b>	Rauschen der Empfangselektronik
	Beugung der Laserstrahlen im Film des kondensierten Nebels

**Tabelle 8:** Ursachen der systematischen und zufälligen Fehler [ 74 ]

Durch Einblasen der Sekundärluft kommt es im oberen Teil des Modells zur starken Verwirbelung der Strömung. Dementsprechend erschien es erforderlich, die lokalen Geschwindigkeiten in jedem Messpunkt mehrmals zu bestimmen ( 3 bis 5 Mal ), um auswertbare mittlere Werte zu erhalten. Die systembedingten Schwankungen sind als Hauptquelle der möglichen Fehler bei den Untersuchungen anzusehen. Die größte Genauigkeit wurde bei höheren Geschwindigkeiten erreicht, weil die Standardabweichung vom Mittelwert dabei am niedrigsten war. Unter Berücksichtigung des langen Messzeitraumes von bis zu 600 s pro einzelner Geschwindigkeitsermittlung und der hohen Zahl der aufgenommenen LDA-Signale von bis zu 10000 ist von einer guten Übereinstimmung der erhaltenen Ergebnisse auszugehen.

#### **10.4. Fehlerbetrachtung zu den Untersuchungen der Ansätze**

Die chemische Zusammensetzung der Ansatzprobe wurde mit Hilfe eines Atomabsorption-Spektrometers analysiert. Das Messgerät ermöglicht die Bestimmung von Elementen mit Anteilen um 0,01 %. Die Standardabweichung bei den chemischen Analysen liegt bei 1 %. Für die weitere röntgenografische Phasenanalyse wurden die aus dem Ofen herausgebrochenen Ansätze in einer Mühle zu Pulver zermalen. Dabei konnten die metallisch

vorliegenden Komponenten der Ansätze teilweise oxidiert werden, was zu Fehlern bei der Bestimmung der Phasenzusammensetzung der Proben führen konnte. Die Nachweisgrenze für die röntgenografische Phasenanalyse lag aufgrund des hohen Messzeitaufwandes ( bis zu einem Tag pro Probe ) um 1 % [ 82 ].

Weiterhin ist zu betonen, dass die aus dem Ofen herausgebrochenen Ansatzproben inhomogen sind. Aus diesem Grund sind die erhaltenen Ergebnisse der chemischen und röntgenografischen Untersuchungen nicht vollständig repräsentativ.

### **10.5. Fehlerbetrachtung zu den thermodynamischen Berechnungen**

Das Programm ChemSage beinhaltet selber keine Angaben zu systematischen Fehlern bei den thermodynamischen Berechnungen des untersuchten Stoffsystems. Die Genauigkeit der erhaltenen Ergebnisse hängt in Wesentlichen von den für die Erstellung des thermodynamischen Datensatzes verwendeten thermodynamischen Stoffdaten ab.

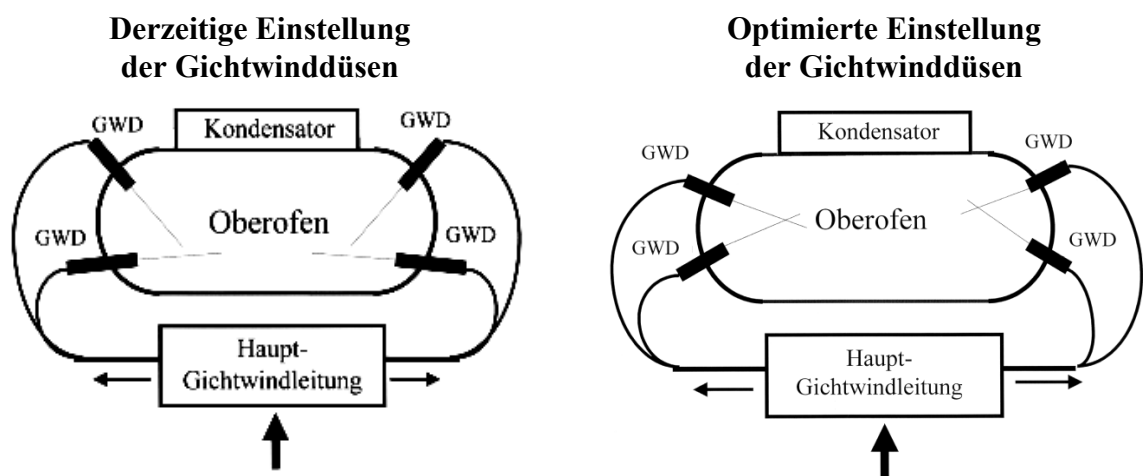
## 11. Vorschläge zur Optimierung des IS-Verfahrens

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen lässt sich eine Reihe allgemeiner Schlussfolgerungen zur Verbesserung der Ofenführung ziehen. Außerdem können einige Empfehlungen zur konstruktiven Veränderung der IS-Anlage gegeben werden. Bei Anwendung aller Vorschläge ist mit einer Optimierung des gesamten Prozesses zu rechnen.

### 11.1. Gichtwindzuführung

An Hand der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung lassen sich die folgenden Aussagen hinsichtlich der Einstellung der Gichtwindzuführung treffen:

- Die heutige Einstellung der Düsen, bei welcher der Gichtwind in Richtung Vorderwand eingeblasen wird, muss unbefriedigend bleiben, weil keine effektive Verwirbelung des Ofenraumes erreicht wird. Infolgedessen entstehen in mehreren Ofenbereichen Bedingungen, unter denen die Ansatzbildung verstärkt auftritt. Aus diesem Grund ergibt sich die Notwendigkeit die Position der Gichtwinddüsen zu ändern. Die Sekundärluft soll symmetrisch ( s. Bild 88 ) in die Mitte des Ofens eingeblasen werden.

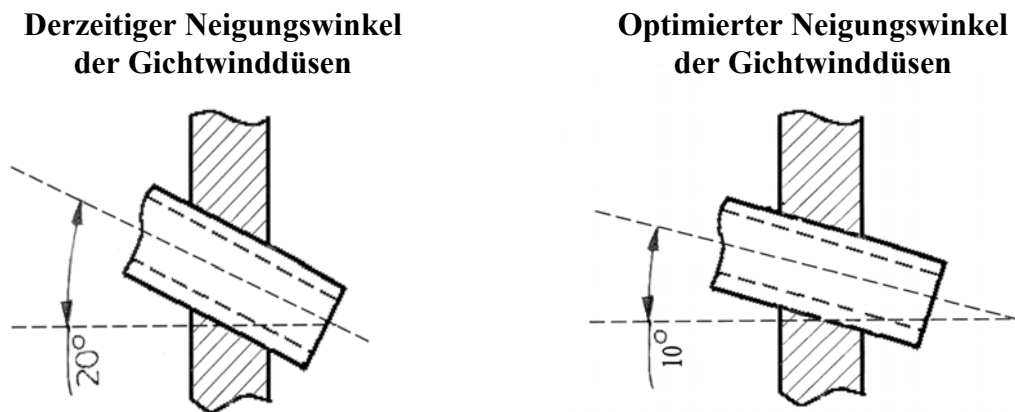


**Bild 88:** Derzeitige und optimierte Einstellung der Gichtwinddüsen

- Auch der Neigungswinkel der Düsen soll geändert werden. Zur Zeit wird der Gichtwind mit  $20^\circ$  nach unten eingeblasen. Dadurch besteht die Gefahr, dass die kräftigen Einlaufströmungen aus den Gichtwinddüsen die Mölleroberfläche erreichen und die leichten Beschickungsteile aufwirbeln können. Dadurch kann der Staubaustrag aus dem Ofen vergrößert werden. Um diesen Vorgang zu vermeiden und andererseits



die hohe Verweilzeit der Sekundärluft zu erhalten, sollte die Neigung der Düsen geändert werden. Ein Einblaswinkel von  $10^\circ$  hat sich als günstig erwiesen.



**Bild 89 :** Derzeitiger und optimierter Neigungswinkel der Gichtwinddüsen

- Um eine bessere Abbremsung der aus dem Schacht aufsteigenden Gase und effektivere Verwirbelung der Gasströme zu erzielen, sollte man das Gichtwindvolumen um 25 % erhöhen. Dadurch kann die Sekundärluft im oberen Teil des Ofens länger verweilen und strömt nicht nach dem Einblasen sofort in den Abgaskanal. Als Ergebnis erfasst der Gichtwind fast den ganzen Oberofenraum und die Totzonen an den Wänden werden stark reduziert. Von der anderen Seite können die aus dem Kondensator versprühten Bleitropfchen von der Abgasströmung mit der höheren Geschwindigkeit schon im Übergangsbereich abgebremst werden. Dadurch sollen sie den Ofen nicht erreichen und im Übergangsbereich an den Wänden nur zum Teil haften bleiben, weil aufgrund der höheren Geschwindigkeiten die Bleitropfchen in den Kondensator zurück gedrückt werden. Somit kann man mit dem Rückgang des Ansatzwachstums rechnen.
- Diese Erhöhung des Gichtwindvolumens kann durch die Zugabe eines Teiles der Abgase nach dem Kondensator erreicht werden. Es ist zu betonen, dass diese Maßnahme einen entsprechenden Umbau der IS-Anlage erfordert, d.h. ein zusätzliches Gebläse ist zur Erhöhung des Gichtwindvolumens notwendig.

Aus strömungsmechanischer Sicht sollten die vorgeschlagenen Veränderungen einen positiven Einfluss hinsichtlich der Reduzierung der Ansatzbildung im oberen Teil des Ofens und im Übergang zum Kondensator ausüben. Außerdem soll die Nachverbrennung des Kohlenmonoxides und des mechanisch mitgerissenen Staubes verbessert werden.

## **11.2. Gestaltung des Überganges zwischen Ofen und Kondensator**

Die Untersuchungen im Originalofen ergaben, dass sich die mächtigsten Ansätze an der unteren Kante des Austrittes bilden. Schon nach 6 Tagen wiesen sie eine Dicke von bis zu 800 mm auf. Außerdem sind die Ansätze von dieser Stelle schwer zu entfernen. Um das Problem wenigstens teilweise zu beseitigen wäre es sinnvoll, neben der Umstellung der Gichtwindzuführung die untere Kante des Austrittes abzurunden. Wie schon betont wurde, strömen die Ofengase direkt in den Übergangsbereich, ohne vom Gichtwind abgebremst zu werden ( s. Kapitel 6.3.4. ). Weil die Geschwindigkeit und die Aufprallkraft am Austritt groß sind, werden die vorhandenen ZnO-Partikel von der Gasströmung kräftig an die untere Kante geschleudert werden. Dies führt zum Anhaften von Teilchen und zur Ansatzbildung an dieser Stelle im IS-Ofen. Hinter den Ansätzen entstehen die Totzonen, welche mit den ZnO-Partikeln ausgefüllt werden.

Durch die Abrundung der unteren Kante des Austrittes kann man die Anhaftung der ZnO-Partikel minimieren und die Entwicklung der Totzonen in diesem Abschnitt aufgrund der Form der Umströmung ausschließen. Resultierend daraus soll die Ansatzbildung an dieser Stelle stark verringert werden [ 46, 77 ].

Die Analysen haben einen hohen Anteil des aus dem Kondensator stammenden Bleis in den Ansatzproben nachgewiesen. Das Metall wird von Rotoren dem Ofengasstrom entgegen versprüht. Ein Teil davon gelangt dabei bis an die Wände, schlägt sich nieder und trägt anschließend zum Ansatzwachstum bei, weil die Metalleinschlüsse einen Belag zum Anhaften von ZnO-Partikeln darstellen. Dies verursacht hohe Kondensatorbleiverluste, welche regelmäßig ausgeglichen werden müssen, und größere Ausmaße der Ansätze in der Anlage besonders an der unteren Kante des Austrittes.

Um dieses Problem zu lösen, soll man den Übergangsbereich länger machen. Während der Analyse der von der Glockenoberfläche entnommenen Ansatzproben wurde das aus dem Kondensator stammende Blei festgestellt. Daraus folgt, dass die Flugbahn eines aus dem Kondensator versprühten Bleitropfchens bis zu 6 m beträgt ( der Abstand zwischen dem ersten Rotor und der Chargierglocke ). Damit das Kondensatorblei den Ofen nicht erreichen und dort nicht ablagern kann, soll die Länge des Übergangsbereiches von 4 m auf 8 m vergrößert werden. Als Ergebnis dieser Umstellung der Anlage sollen die Bleitropfchen keinen Betrag zum Ansatzwachstum an der unteren Kante des Austrittes leisten und nur im Übergang bleiben.

Unter Berücksichtigung dieser vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen ist eine Verringerung der Ansatzbildung im Ofenschacht und im Übergang zum Kondensator zu erwarten, welche zur Erhöhung des Wirkungsgrades des gesamten Verfahrens führen kann. Trotzdem sollten die Verbesserungsvorschläge erst im Originalofen getestet werden. Nur nach den Betriebsuntersuchungen können Aussagen über ihren Einfluss auf das ganze Verfahren getroffen werden.

### 11.3 Wirtschaftliche Betrachtung

Wie schon im Kapitel 8.1. beschrieben wurde, werden die Ansätze bei MHD ein Mal pro Woche beseitigt. Der damit verbundene Renigung der IS-Anlage dauert bis zu 12 Stunden. Somit beträgt der gesamte Produktionsausfall ( Renigung, Abkühlung und Erwärmung des Ofens ) etwa 24 h.

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Vorschläge zur Optimierung der IS-Anlage ist eine Reduzierung der Ansätze zu erwarten. Dadurch kann die Anzahl der Stillstände für die Ansatzbeseitigung werden und die Betriebszeit der IS-Anlage verlängert werden.

Für eine Jahresproduktion von ca. 100000 Tonnen Zink und ca. 40000 Tonnen Blei ( bei rund 310 Arbeitstagen pro Jahr ) ergibt sich ein Zuwachs von rund 6000 t Zn und ca. 2000 t Pb, wenn der Stillstand des Ofens nur alle 10 Tage durchgeführt wird. Bei einem Zinkpreis von ca. 920 USD/t und dem Bleipreis von ca. 610 USD/t ( Angaben der Londoner Börse für NE-Metalle, Stand 03.11.2003 ) resultiert daraus jährlich ein Umsatz von ca. 6,5 Mio. USD/Jahr im Vergleich zum gegenwärtigen Stand.

Durch die weitere Reduzierung der Anzahl der Stillstände für die Ansatzbeseitigung ist eine wesentliche Erhöhung des Durchsatzes zu erwarten. Wenn die Ansätze jede zweite Woche aus dem Ofen entfernt werden, wird sich der jährliche Umsatz um ca. 8,6 USD/Jahr erhöhen. Tabelle 9 zeigt, dass der jährliche Umsatz mit der Abnahme der Häufigkeit der Putzschichten steigt.

Häufigkeit der Putzschichten [Tage]	Zunahme der Zinkproduktion t	Zunahme der Bleiproduktion t	Zunahme des Umsatzes Mio. USD/Jahr
Nach 10	6000	2000	6,5
Nach 13	8000	2800	8,6
Nach 20	11000	3800	12,2

**Tabelle 9:** Zunahme des Umsatzes in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Putzschichten

Weiterhin ist zu bemerken, dass neben den üblichen Schichtarbeitern zusätzlich 30 Arbeitskräfte bei jeder Ofenreinigung eingesetzt werden, um die Ansätze möglichst schnell beseitigen zu können. Diese außerplanmäßig entstehenden Personalkosten können durch die Reduzierung der Anzahl der Stillstände gesenkt werden. Unter Berücksichtigung des Durchschnittseinkommens von ca. 35000 EUR pro Jahr und der mittleren Jahresarbeitszeit von ca. 1720 Stunden ( Angaben der IG Metall, Stand Oktober 2003 ) ergibt sich ein Stundenlohn in Höhe von rund 20 EUR/St. Aus diesem Grund fällt pro Stillstand des Ofens eine Summe von ca. 5000 € für die 30 Reinigungskräfte an. Dadurch entstehen zusätzliche Personalkosten von ca. 260000 € jährlich bei 52 Stillständen.

Unter Annahme eines 10-tägigen Wartungszyklus für die Entfernung der Ansätze werden ca. 100000 € eingespart und 160000 € für die Ofenreinigung benötigt. Bei weiterer Reduzierung der Anzahl der Stillstände ( nach 13 Tagen ) werden die zusätzlichen Personalkosten von ca. 260000 € auf 130000 € gesenkt. Wenn die Ansätze nur jede dritte Woche beseitigt werden, sind nur noch 90000 € für die Reinigungsstillstände aufzuwenden. Die Einsparung beträgt dann 170000 €.

Unter Berücksichtigung der vorgeschlagenen Maßnahmen zur Optimierung des IS-Prozesses sind die obengenannten Einsparungen ( Personalkosten ) sowie die Erhöhung des jährlichen Umsatzes zu erwarten.

## 12. Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Modelluntersuchungen der Strömungsverhältnisse am Beispiel des Imperial Smelting-Ofens. Die durchgeführten Untersuchungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass die Simulation der in der Gasphase ablaufenden Strömungsvorgänge eines pyrometallurgischen Aggregates mittels eines physikalischen Modells realisierbar ist. Aufgrund der Berücksichtigung der Arbeitsweise des Ofens sowie der Ähnlichkeitstheorie bei der Prozessmodellierung, können die erhaltenen Ergebnisse in der Tendenz auf das Original übertragen werden. Damit besteht die Möglichkeit, auch andere pyrometallurgische Verfahren in einem „kalten“ Modell zu simulieren.

Die Versuche verfolgen das Ziel, Erkenntnisse über optimale Einblasbedingungen der Sekundärluft zu erhalten, um die Neigung zur Ansatzbildung verringern zu können. Deshalb wurde die Gasgeschwindigkeitsverteilung bei verschiedenen Einstellungen der Gichtwinddüsen in unterschiedlichen Höhen aufgenommen.

Die Experimente erfolgten unter Vernachlässigung des Beschickungseinflusses auf die Ofenströmung. Entsprechend der getroffenen Annahmen wurde ein geometrisch ähnliches Modell verwendet, das die im Originalofen ablaufenden Strömungsvorgänge möglichst realistisch widerspiegeln kann. Damit kann man die Strömungsvorgänge im oberen Bereich der Imperial Smelting Anlage relativ genau beschreiben.

In den durchgeführten Modelluntersuchungen konnten verschiedene Abhängigkeiten nachgewiesen werden. Beim Vergleich der erhaltenen Geschwindigkeitsfelder gelangt man zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Sekundärluft übt einen großen Einfluss auf die Ofenströmung aus. Je nach der DüsenEinstellung wurden unterschiedliche Strömungsprofile aufgenommen.
- Durch die Variation der Gichtwindzuführung kann man eine bessere Durchströmung des Modellraumes erreichen.
- Nach Einblasen der Sekundärluft in die Modellmitte wurde eine gleichmäßige Durchgasung des ganzen Querschnitts erreicht. Bei den anderen Einstellungen wurden nur bestimmte Stellen stark umströmt. Dadurch verbreiterten sich die Totzonen. Daraus kann man schlussfolgern, dass die Position der Düsen, bei welcher der Gichtwind symmetrisch in die Modellmitte eingeblasen wird, am effektivsten ist.
- Bei den geeigneten DüsenEinstellungen wurde eine effektive Vermischung des Gichtwindes mit der Primärluft auf einem Niveau unter den Düsen erreicht. Daraus resultiert eine größere Verweilzeit der Sekundärluft im oberen Teil des Modells. Als Folge

ist eine deutliche Reduzierung der Ansatzbildung im Vergleich zu dem horizontalen Einblasen des Gichtwindes zu erwarten.

- Bei der Neigung von  $20^\circ$  wird der Gichtwind steiler eingeblasen. Dadurch kann er in Berührung mit dem Möllerniveau kommen. Als Ergebnis können die kräftigen Einlaufströmungen der Gichtwinddüsen die kleineren Beschickungsteile mitreißen. Dadurch wird der Staubaustrag aus dem Ofen begünstigt. Um diesen Vorgang zu vermeiden und andererseits die hohe Verweilzeit der Sekundärluft zu erhalten, sollte die Neigung der Düsen geändert werden. Ein Einblaswinkel von  $10^\circ$  hat sich als günstig erwiesen.
- Durch die Erhöhung des Volumens des Gichtwindes wurde eine effektivere Geschwindigkeitsverteilung im Modell erreicht. Es gelingt, die Primärluft effektiver abzubremesen. Dadurch kann die Nachverbrennung des Kohlenmonoxides und des mechanisch mitgerissenen Staubes positiv beeinflusst werden.
- Ein anderer positiver Einfluss ist die Form der Umströmung der unteren Kante des Austrittes, wo die größten Ansätze im Originalofen festgestellt wurden. Aufgrund der Art und Weise der Gichtwindzuführung gelingt es den scharfen Übergang der Gasmischung zu vermeiden und die Totzone an dieser Stelle abzubauen.
- Es sind immer mehr oder weniger große Totzonen in Wandnähe vorhanden. Daraus kann man schlussfolgern, dass die Ansatzbildung im Originalofen nicht vollständig auszuschließen ist, jedoch deutlich geringer ausfällt.

Es ist festzustellen, dass eine gute Reproduzierbarkeit der gemessenen Daten erzielt wurde. Man kann charakteristische Abhängigkeiten zwischen den Einstellungen der Düsen und den Strömungsprofilen feststellen. Es gelingt, die ablaufenden Strömungsvorgänge zu erläutern und den Prozess der Ansatzbildung an den Wänden zu verstehen. Die Modelluntersuchungen ermöglichen die Voraussage von Änderungen im Betriebsverhalten des IS-Ofens bei verschiedenen Gichtwindzuführungsparametern.

Im Ergebnis aller durchgeführten Analysen lassen sich folgende Aussagen für den Bildungsmechanismus der Ansätze treffen: an jeder Probenahmestelle wurde ein Zusammenhang zwischen den Strömungsbedingungen und der Ansatzerscheinung festgestellt. Auch die für die Ansatzbildung wichtige Zinkrückoxidation am Mauerwerk können durch die Ofenströmung stark beeinflusst werden.

Die chemische Analyse ergab interessante Befunde bezüglich der Mengenanteile der vorliegenden Komponenten. Es wurde festgestellt, dass die Ansätze vorwiegend aus ZnO und

metallischem Blei bestehen. Die Anreicherung von anderen Elementen wie Eisen und Calcium wurde in sehr begrenzten Zonen ( Ansatzoberfläche ) nachgewiesen. Die Ablagerung von Primärstaub wurde nur bei den Proben von der Ofenwand festgestellt.

Weiterhin konnte eine Abhängigkeit der Ansatzdicke vom Ofenbereich beobachtet werden. Im Übergangsbereich und an der unteren Kante des Austrittes ist die Ansatzdicke größer als im Schachtinneren ( Glockenoberfläche und Ofenwand ). Dieser Zusammenhang kann folgendermaßen erklärt werden:

Wie bereits festgestellt wurde ist das aus dem Kondensator versprühte Blei der Auslöser der Ansatzbildung in der IS-Anlage. Die Metalleinschlüsse schlagen sich am Mauerwerk nieder und wirken dabei wie ein „Kleber“ für die in der Gasphase vorhandenen ZnO-Partikel, die dadurch an den Wänden haften bleiben können. Die aus dem Kondensator stammenden Bleitropfchen können dabei die Oberfläche des Überganges und die untere Kante des Austrittes erreichen und sich dort sammeln. Aus diesem Grund ergab sich an dieser Stelle eine hohe Ansatzschichtdicke von bis zu 800 mm. Im Schachtinneren, welcher für das Kondensatorblei unerreichbar ist, wurden dünnere bzw. gar keine Ansätze festgestellt.

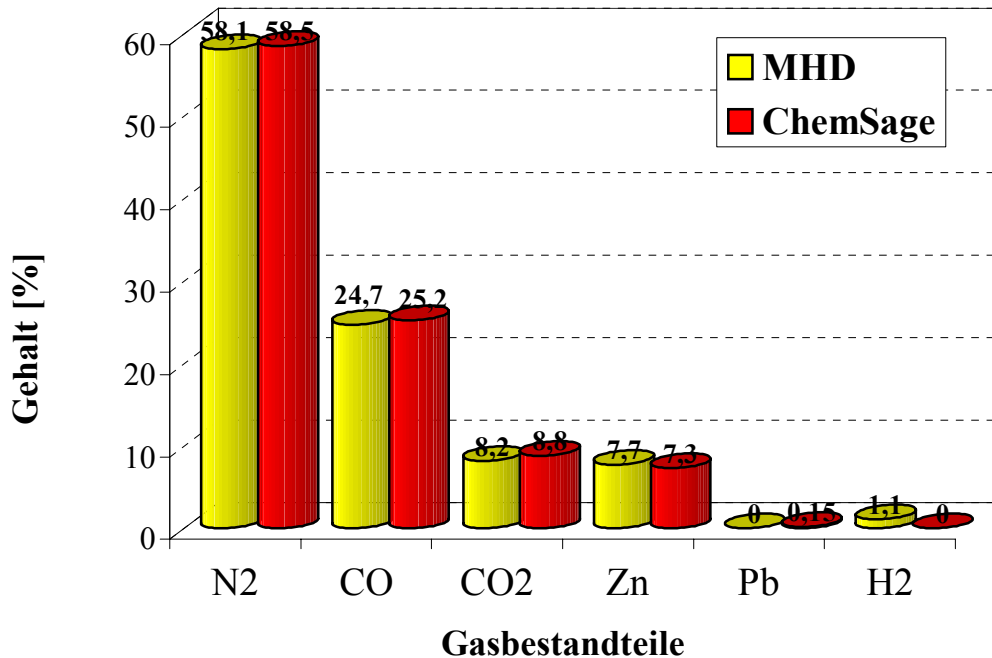
Die untersuchten Ansätze zeigten einen schichtenförmigen Aufbau, wobei jede Probe eine individuelle Struktur besitzt. Die Ansätze von der Glockenoberfläche sind sehr voluminös und porös. Die Proben vom Austritt und aus dem Übergangsbereich sind kompakt gebaut und haben dadurch eine höhere Härte. Resultierend kann man feststellen: der Ansatz wird um so fester, je größer die Gasgeschwindigkeit an seiner Wachstumsstelle ist.

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen geht deutlich hervor, dass die Strömungsbedingungen einen maßgeblichen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung und die Eigenschaften der Ansätze haben. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die Ansatzbildung durch geeignete Strömungsparameter im Oberofen der IS-Anlage vermindert werden kann.

Bezüglich der Berechnung mit ChemSage ist festzustellen, dass ein thermodynamisches Modell in der Lage, ist die Vorgänge im Oberofen prinzipiell zu beschreiben, welche zur Ansatzbildung an den Wänden führen. Die Zusammensetzung der berechneten Gasphase stimmt mit der Betriebszusammensetzung des Gichtgases beim Eingang in den Kondensator überein ( s. Bild 90 ). Mit dem thermodynamischen Modell ist es aber nicht möglich, kinetische Aspekte zu berücksichtigen.

Bei den thermodynamischen Berechnungen kommt Zink besonderes Interesse zu. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen, dass es den größten Beitrag im Vergleich zu den anderen Komponenten der Gasphase zur Ansatzbildung leistet. In Übereinstimmung mit den

Literaturangaben treten die Ansätze am Mauerwerk schon bei einer Temperatur von 1000 °C auf. Diese setzen sich hauptsächlich aus ZnO und metallischem Blei zusammen, weil die beiden Komponenten an den Ofenwänden haften bleiben.



**Bild 90:** Vergleich der prozentualen Zusammensetzung des Gichtgases

Es wurde berechnet, dass die Rückoxidation des Zinkes mit der Zunahme des Gichtwindvolumens erhöht wird. Der Grund dafür ist, dass mehr Sauerstoff mit der Sekundärluft eingeblasen wird. Dadurch entsteht im System mehr CO<sub>2</sub>. Daraus resultierend, wandelt sich mehr Zn zu ZnO um. Außerdem ist eine höhere Temperatur im System erforderlich, um die Rückoxidation zu unterdrücken.

Als alternative Lösung kann man einen Teil der Abgase nach dem Kondensator zusammen mit dem Gichtwind in den Ofen zurückführen. Dadurch gelingt es, die positive Wirkung des erhöhten Gichtwindvolumens effektiv einzusetzen. Andererseits ist der Sauerstoff in den Abgasen bereits als CO oder als CO<sub>2</sub> gebunden. Im Ergebnis wird das CO<sub>2</sub>/CO-Verhältnis durch die Zunahme der Sekundärluftmenge kaum beeinflusst.

An Hand der Berechnungen leiten sich folgende Angaben zum technologischen Optimum des Verfahrens ab:

- Die Arbeitstemperatur an den Wänden im Oberofen soll oberhalb von 1024 °C liegen, damit kein ZnO in diesem Abschnitt des Ofens entstehen kann. Wenn die Temperatur über diesen Wert liegt, ist kaum eine Ansatzbildung zu erwarten.



- $\text{H}_2\text{O}$  übt einen negativen Einfluss auf den Gesamtprozess aus. Die Ergebnisse zeigen, dass deutlich mehr Zink bei Anwesenheit von Wasserdampf rückoxidieren kann. Deshalb sollte die Sekundärluft vor dem Einblasen zusätzlich getrocknet werden.
- Die Zunahme des Gichtwindvolumens, wenn es Luft ist, führt zur Erhöhung der Rückoxidation des Zinkes.
- Die Vergrößerung der Sekundärluftmenge kann man durch die Zugabe der nach dem Kondensator entnommenen Abgase erreichen. Auf diese Weise gelingt es, die Rückoxidation des Zinkes wenig zu beeinflussen.
- Die anderen Komponenten der Beschickung leisten einen deutlich niedrigeren Beitrag zum Ansatzwachstum als Zink. Aus diesem Grund kann man ihre Wirkung in diesem Fall vernachlässigen.

Dieses Modell ist in der Lage auch andere Prozesse, wie z.B. die Ansatzbildung an den Wänden, deutlich zu machen. Aus den Untersuchungen der Abscheidungen der Nebelflüssigkeit an den Modellwänden lassen sich die Schlußfolgerungen zur Ansatzbildung im Original ziehen. Die Stellen, an denen die Niederschläge nachgewiesen wurden, stimmen mit den Stellen der Ansatzbildung im IS-Ofen bei MHD überein. Als Ergebnis der Experimente kann man feststellen, dass das Modell in der Lage ist, im Labormaßstab die Ansatzbildung durch die Beobachtung der Tröpfchen der Nebelflüssigkeit zu beschreiben. Es ist zu betonen, dass die Abscheidung in einem "kalten" Modell stattfand. Die durch die CO-Nachverbrennung entstehende Wärme, die zur Erhöhung der Temperatur im Oberofen führt, kann dabei nicht berücksichtigt werden. Die zuvor dargestellten Ergebnisse sollten mit der thermodynamischen Berechnung verglichen und verknüpft werden, um ein reales Bild der im Oberofen der IS-Anlage ablaufenden Vorgänge zu erhalten. Dadurch bekommt man die Möglichkeit, die Ansatzbildung nicht nur zu erklären sondern auch vorherzusagen und schliesslich zu beeinflussen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die während der Experimente gemessenen Geschwindigkeitsfelder die Prozesse anschaulich wiedergeben. Mit Hilfe der Modelluntersuchungen ist man damit in der Lage, Strömungsvorgänge im oberen Teil des IS-Ofens sichtbar zu machen und Ursachen der Ansatzbildung abzuleiten. Weitere Verbesserungen des Modells im Hinblick auf die obigen Ausführungen sind in Verbindung mit dem Ofenumbau bei MHD und mit der Weiterentwicklung der Messmethode erstrebenswert bzw. notwendig.

## Literaturverzeichnis

- [1] Pawlek, F.: „Metallhüttenkunden“, Verlag: De Gruyter, Berlin, 1983
- [2] Egorov, K., Kostrov, S.: „Scab formation in Blast Furnaces and its avoidance during charging“, Metallurg 5 (1980)
- [3] Gray, P.M.J., Lill G.D.: „Automatic control of the Imperial Smelting Furnace“ Institution of Chemical Engineers, London, 1968
- [4] Morgenstern, G.: „Modelltechnische Untersuchungen in einem Kupfer-Anodenkippen“, Dissertation, TU Bergakademie, Freiberg 1983 Ullmann, F.:
- [5] Schmidt, J.: „Strömungstechnische Modelluntersuchungen zur Optimierung der Einblasparameter für einen Peirce-Smith-Konverter“, Dissertation, TU Bergakademie, Freiberg 1990
- [6] Zeisel, H.: „Mathematische Modellierung und numerische Simulation der Vorgänge im Hochofen“, Universitätsverlag Rudolf Trauner, Linz 1995
- [7] „Ullmann’s Encyclopaedia of Industrial Chemistry“, 1996
- [8] Davis, J.K. & Associates : „Metals Handbook“, ASM International, 1998
- [9] Temple, D.: „Zinc-Lead Blast Furnace – The key developments“ Metallurgical Transactions; American Society for Metals and the Metallurgical Society of AIME, Volume 11B, 1980
- [10] Morgan, S., Lumsden, J.: „Zinc Blast-furnace operation“, Journal of Metals, 1959/4
- [11] Berghöfer, A.: „Direkte Verarbeitung von zink- und bleihaltigen Feinstäuben im Imperial-Smelting Schachtofen“, Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 1999
- [12] Schneider, W.-D., Schwab, B.: „Zinkerzeugung aus Sekundärmaterial“, Erzmetall 51 (1998)
- [13] Kola, R.: „Sekundärvorstoffe im Imperial-Smelting-Schachtofen der „Berzelius“ Metallhütten-GmbH, Duisburg, Erzmetall 35 (1982)
- [14] Morgan, S.W.K., Woods, S.E.: „Avonmouth Zinc Blast Furnace demonstrates its versatility“, Engineering and Mining Journal, September, 1958
- [15] Heinz, F.: „Erzeugung von NE-Metallen“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978
- [16] Vanukov, A., Zaitsev, V.: „Teoriya pirometallurgicheskikh processov“, Metallurgija, Moskau, 1993

- [17] Lee, F.T., Hayes, P.C.: „Microstructural changes of the reduction of the Imperial Smelting Furnace Sinters” I.S.P-Conference, 1970
- [18] Lumsden, J.: „The physical chemistry of the Zinc Blast Furnace“, I.S.P-Conference, 1970
- [19] Briehl, H.: „Chemie der Werkstoffe“, Teubner-Verlag, Stuttgart 1995
- [20] Korthas, B.: „Untersuchungen der Verbrennungsvorgängen hoher Kohlenstaubmengen unter hochofennahen Bedingungen und ihre Auswirkung auf die Hochofenströmung“, Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 1987
- [21] Yoshikuni, H.: „Summary report of robot system for removing accretion from ISP-Furnace”. Robot-Tokyo 10 (1995)
- [22] Päßler, K.: „Untersuchungen zur Ansatzbildung über Bodendüsen im Eisenbadreaktor beim Einblasen von Wasserdampf als Düsenkühlmittel“. Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 1989
- [23] Krupkowski, A., Fik, H.: „Studie der Kondensation und Oxidation der Metaldämpfe in Anwesenheit von CO, CO<sub>2</sub> und neutraler Gase sowie ihre Anwendung bei Zink-Gewinnungsprozessen“, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1967
- [24] Antipov, Vizlov, Griskova: „Control of blast furnace practice at scab formation”, Stal, December, 1983
- [25] Willems, J., Heyner, G.: „Untersuchungen über Ansätze im Hochofen und ihre Beseitigung durch Sprengen“, Stahl und Eisen 84 (1964)
- [26] Kahlhöfer, G., Overkott, E.: „Untersuchungen am Schachtmauerwerk von ausgebrochenen Hochöfen”, Stahl und Eisen 85 (1965)
- [27] Creese, R.C., Healy, G.W.: „A chemical equilibrium model of the Imperial Smelting Blast furnace”, Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 14, No 2 (1975)
- [28] Sevagen, A., Madelin, B.: „Investigation and modelling of the zinc blast furnace”, Erzmetall 41 (1988), Nr.10
- [29] Clarke, J.A., Fray, D.J.: „Oxidation kinetics of zinc vapour”, Institute of chemical symposium series, Institute of chemical engineers, London, 1975
- [30] Dell’Amico, M., See, J.B.: „Accretion reduction in the offtake of the Imperial Smelting Furnace”, ISP-Conference, 1982
- [31] Scott, J.V., Fray, D.J.: „Oxidation of zinc vapour“, ISP-Conference, 1964

- [32] Lutao Li: „Untersuchung zum Verhalten von Zink und Blei bei der Stahlerzeugung“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992
- [33] Schneider, W.-D.: „Angaben zum IS-Prozess“, Persönliche Mitteilung an Prof. Stelter
- [34] Warner, N.A.: „Lead volatilisation“, ISP-Conference, 1982
- [35] Schneider, W.-D., Schwab, B., Berghöfer A.: „Verarbeitung von zinkhaltigem Sekundärstaub bei den M.I.M. Hüttenwerken in Duisburg“, Stahl und Eisen 118 (1998)
- [36] Evans, C.J.G., Gray, P.M.J.: „Influence of raw materials composition on the zinc-lead blast-furnace“, ISP-Conference, 1972
- [37] Antrekowitsch, H., Paschen, P., Antrekowitsch, J.: „Mengen- und Energiebilanz bei der Herstellung von Zink“, Erzmetall 54 (2001)
- [38] Nyirenda, R.L.: „The processing of steelmaking flue-dust: a review“, Minerals Engineering, Vol. 4, 1991
- [39] Radestock, J., Jeschar, R.: „Über die Strömung durch die Hochofenschüttung“, Stahl und Eisen 90 (1970)
- [40] Hanse, M.: „Strömungsverhältnisse in der Hochofensäule“, Archiv für das Eisenhüttenwesen 34 (1963)
- [41] Jeschar, R.: „Druckverlust in Mehrkornschüttungen aus Kugeln“, Archiv für das Eisenhüttenwesen 35 (1964)
- [42] Kahlhöfer, G.: „Zusammenhang zwischen Ofenart und Verschleiß der feuerfesten Auskleidung im Hochofen“, Stahl und Eisen 74 (1954)
- [43] Kobahidze, V.: „Teplovaya rabota i konstrukzii pechei zvetnoi metallurgii“, MISIS, Moskau 1994
- [44] Gushin, S., Ageev, N., Krüchenkov, Y.: „Teoreticheskie osnovi enegrotehnologicheskikh prozessov zvetnoi metallurgii“, UPI, Ekaterinburg 2000
- [45] Krivandin, V.: „Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva“, MISIS, Moskau 2002
- [46] Rumpf, H.: „Über das Absetzen fein verteilter Stoffe an den Wänden von Strömungskanälen“, Chemie-Ing.-Tech. 25 (1953)
- [47] Richards, K.: „Accretion formation in the gas injection“, Konferenzeinzelbericht: The Howard Worner International Symposium, Australia, 1996
- [48] Bi-X, Qui-J, Wang-W: „Influences of scaffold and coal injection on gas and liquid flow“, Iron and Steelmaking, 2001/1

- [49] Päßler, K.: „Untersuchungen zur Ansatzbildung über Bodendüsen im Eisenbadreaktor beim Einblasen vom Wasserdampf als Düsenkühlmittel“, Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 1989
- [50] Schlebusch, D.W.: „Untersuchungen zur Ansatzbildung an der feuerfesten Ausmauerung von Drehrohröfen zur Direktreduktion von Eisenerzen“, Dissertation Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 1979
- [51] Lackner, A.: „Strömungssimulation in verschiedenen Reaktoren der NE-Metallurgie“, Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben 1996
- [52] Zhu M.-Y., Inomoto, T., Sawada, I.: „Fluid flow and mixing in the ladle stirred by argon through multi tuyere“, ISIJ International, Vol. 35, No. 5 (1995)
- [53] Bantizmanskij, V., Pantionov Y.: „O holodnom modelirovanii gidrodenamiki staleplavitelnogo konvertora“, Izvestija Vuz, Cernaja Metallurgija, 1989/6
- [54] Zhu M.-Y., Sawada, I.: „Physical characteristics of a horizontally injected gas jet and turbulent flow in metallurgical vessels“, ISIJ International, Vol. 38, No. 5 (1998)
- [55] Komarov, S., Itoh, K., Sano, M.: „Mixing phenomena in a liquid bath stripped by gas jets through side and inclined nozzles“, ISIJ International, Vol. 33, No. 7 (1993)
- [56] Timmer, R., Droog, J., Flierman, G.: „Radial gas distribution in the blast furnace top“, Steel Research, 68/2, 1997
- [57] Cross, M., Gibson, R. D., Moon J. T.: „Development and validation of a practical theory to describe gas flow through the blast furnace“, Seminar on Heat and Mass Transfer in Metallurgical Systems, Dubrovnik, Yugoslavia, September 1979
- [58] Ferziger, J.H., Peric, M.: „Computational Methods for Fluid Dynamics“, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 1996
- [59] Zhu M.-Y., Sawada, I., Hsiao T.-C.: „Numerical simulation of three-dimensional fluid flow and mixing process in gas-stirred ladle“, ISIJ International, Vol. 35, No. 5 (1996)
- [60] Dobrskok, B., Titov, I.: „Matematicheskoe modelirovanie processov gazorasprdeleniya v dommennih pechah“, Izvestija Vuz, Cernaja Metallurgija, 1997/5
- [61] Shvydkij, V., Khusainov A.: „Gesetzmäßigkeiten der Wirbelbewegung des Gasstroms im Schachtofen“, Izvestija Vuz, Cernaja Metallurgija, 1991/6
- [62] Loosmore, M.J., Bray, J.W.: „Optimization model of the Lead-Zinc Blast Furnace“, Institute of chemical Engineers, No. 23, 1967
- [63] Schade, H., Kunz, E.: „Strömungslehre“, Walter de Gruyter Verlag, Berlin 1989

- [64] Gersten, K., Herwig, H.: „Strömungsmechanik“, Vieweg Verlag, Wiesbaden 1992
- [65] Eck, B.: „Technische Strömungslehre“, Springer-Verlag, Berlin 1991
- [66] Hackeschmidt, M.: „Grundlagen der Strömungstechnik I“, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1969
- [67] Polthier, K.: „Strömung und Wärmeübergang in Schüttungen mit rotationssymmetrischen Oberflächenprofilen und Kornverteilungen“, Archiv für das Eisenhüttenwesen 37 (1966)
- [68] Ruck, B.: „Angewandte Laser-Doppler-Anemometrie“, Springer-Verlag, Berlin 1985
- [69] Giese, M.: „Strömung in porösen Medien unter Berücksichtigung effektiver Viskositäten“, Dissertation Technische Universität München, München 1998
- [70] Albrecht, H. E.: „Laser-Doppler-Strömungsmessung“, Akademie-Verlag, 1986
- [71] Durst, F.: „Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie“. Karlsruhe 1987
- [72] Ruck, B.: „Laser-Doppler-Anemometrie, eine berührungslose optische Strömungsgeschwindigkeitsmesstechnik“, Laser und Optoelektronik, Nr.4/1985
- [73] Donges, A.: „Lasermesstechnik“, Hüthig Buch Verlag Heidelberg, 1993
- [74] Hanko, G.: „Untersuchung und Bestimmung der Hydrodynamik einer Kupfergewinnungselektrolyse mittels LDA“, Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2000
- [75] Kaidalov, A.: „Untersuchungen zur Beeinflussung der Strömungsverhältnisse im IS-Schachtofen für den umwelt- und energieschonenden Einsatz von Sekundärrohstoffen“, Diplomarbeit, TU Bergakademie Freiberg, 2000
- [76] Lange H.-J.: „Anwendung der Laser-Doppler-Anemometrie zur Untersuchung von Strömungsvorgängen in pyro- und hydrometallurgischen Apparatemodell“, Heft 77 der Schriftenreihe der GDMB, 1998
- [77] Elfert, T.: „Computersimulation der Strömung im Kondensator der IS-Anlage der M.I.M. Hüttenwerke Duisburg“, Diplomarbeit, Fachhochschule Bochum, 2001
- [78] Weisheit, J.: „Thermodynamisches Modell des IS-Prozesses“, Bericht, TU Bergakademie Freiberg, 2000
- [79] Jischa, M.: „Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch“, Vieweg Verlag, Braunschweig Wiesbaden 1992
- [80] „VDI-Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang“, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994

- [81] Hackeschmidt, M.: „Grundlagen der Strömungstechnik II“, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1970
- [82] Gorelik, S., Skakov J., Rastorguev L.: „Rentgenograficheskii i elektronno-opticheskii analiz“, MISIS, Moskva , 1994

## Bilderverzeichnis

## Seite

1	Phasengleichgewichte in Abhängigkeit vom CO/CO <sub>2</sub> -Verhältnis und der Temperatur; $p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{Zn}} = 1 \text{ bar}$ .....	8
2	Schema der IS-Anlage.....	9
3	Schematische Darstellung des IS-Schachtofenprozesses.....	10
4	Ansatzbildung in der IS-Anlage.....	13
5	Temperaturprofil im IS-Ofen.....	14
6	Veränderung des Zinkoxidationsgrads im Zn <sub>(g)</sub> -CO <sub>2</sub> -CO-N <sub>2</sub> -System mit der Temperatur.....	16
7	Temperaturprofile im IS-Ofen.....	17
8	Schematische Darstellung des Blei-Kreislaufes.....	18
9	Schüttprofil im IS-Ofen.....	22
10	Strömungsvektoren der Gasströmung im Hochofen.....	25
11	Skizze des IS-Ofenmodells, links – Seitensicht, rechts – Sicht von oben.....	30
12	Grundprinzip der KTA-Technik.....	32
13	Grundprinzip der Laser-Doppler-Anemometrie.....	33
14	Komponenten eines LDA-Systems.....	34
15	Typisches LDA-Signal.....	36
16	Schematische Darstellung der Versuchsanlage: .....	37
17	Prinzipieller Aufbau des Laser-Doppler-Anemometers.....	38
18	Vertikale Strömungsprofile ohne Einblasen des Gichtwindes.....	40
19	Schematische Darstellung der Position der Gichtwinddüsen bei MHD.....	41
20	Die Fotos und die schematischen Darstellungen der Gichtwinddüsen.....	42
21	Drei horizontale Einstellungen der Gichtwinddüsen.....	45
22	Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Positionen der Düsen.....	47
23	Horizontales Strömungsprofil bei den unterschiedlichen Positionen der Düsen; Schnitt unter den Düsen, Sicht von oben.....	48
24	Horizontale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Positionen der Düsen.....	49
25	Geneigte Einstellung der Gichtwinddüsen; a – Draufsicht, b Seitenansicht bei der Neigung 10°, c – Seitenansicht bei der Neigung 20°.....	52
26	Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Düsen.....	53
27	Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen..	54
28	Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen..	55



29	Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Düsen auf dem Schnitt parallel zum Austritt.....	56
30	Horizontale Strömungsprofile bei geneigten Einstellungen der Düsen; Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen.....	58
31	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben.....	59
32	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben.....	60
33	Horizontale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungen der Düsen....	61
34	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben.....	62
35	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Neigung der Düsen; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben.....	63
36	Einstellung der Gichtwinddüsen bei den Untersuchungen mit verschiedenen Gichtgasvolumina; a – Draufsicht, b – Seitenansicht.....	65
37	Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina..	66
38	Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina.	67
39	Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina.	68
40	Vertikale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina auf dem Schnitt parallel zum Austritt, Einblaswinkel 10°.....	69
41	Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina; Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen.....	71
42	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben.....	73
43	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt unter den Düsen; Sicht von oben.....	73
44	Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina..	74
45	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben.....	75
46	Differenz der horizontalen Strömungsprofile in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina; Schnitt in der Mitte des Austrittes; Sicht von oben.....	76
47	Kombinierte Einstellung der Gichtwinddüsen; a – Draufsicht, b – Seitenansicht.....	78

48	Strömungsbild beim Einblasen von Sekundärluft bei der kombinierten Düseneinstellung senkrecht zum Austritt.....	79
49	Differenz der Strömungsprofile in Abhängigkeit von der Position der Düsen...	80
50	Strömungsbild beim Einblasen von Sekundärluft bei der kombinierten Düseneinstellung, Sicht von oben, Schnitt unter den Gichtwinddüsen.....	81
51	Drei horizontalen Strömungsprofile bei der kombinierten Düseneinstellung....	82
52	Schematische Darstellung der Ansatzbildung.....	85
53	Modell der Entstehung der Ansätze im Oberofen der IS-Anlage.....	86
54	ZnO/Zn-Verhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur ohne sowie bei der Anwesenheit von Wasserdampf.....	87
55	Abhängigkeit der ZnO-Bildungstemperatur vom CO <sub>2</sub> /CO-Verhältnis.....	88
56	Verhalten von Blei bei der Temperatursenkung.....	89
57	Vergleich der Gasphasenzusammensetzung bei verschiedenen Gichtwindvolumina.....	90
58	Das CO <sub>2</sub> /CO-Verhältnis in Abhängigkeit von den Gichtwindvolumina.....	91
59	ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Gichtwindvolumina.....	92
60	ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Gichtwindvolumina im Temperaturbereich zwischen 950 und 1050 °C.....	93
61	ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Volumina und Zusammensetzungen des Gichtwindes.....	94
62	ZnO/Zn-Verhältnis bei verschiedenen Volumina und Zusammensetzungen des Gichtwindes im Temperaturbereich zwischen 950 und 1050 °C.....	95
63	Konzentrationsverläufe von K und K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> in Abhängigkeit von der Temperatur.....	97
64	Die Ofenansätze: a - Öffnung für die Chargierglocke, b - Austritt, c - Übergangsbereich, d – Kondensator.....	98
65	Entfernung der Ansätze bei MHD.....	100
66	Übergangsbereich vor und nach der Putzschicht.....	101
67	Probenahmestellen der Ofenansätze: 1 - Ofenwand, 2 - Glockenoberfläche, 3- Austritt, Unten, 4 - Austritt, Oben, 5 – Übergangsbereich.....	102
68	Ansatzprobe von der oberen Kante des Austritts.....	104
69	Schliffbilder der Probe von der Ofenwand; Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1..	106
70	Anschliffbilder der Probe von der Glockenoberfläche; Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1.....	107

71	Anschliffbilder der Probe von der unteren Kante des Austrittes; Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1.....	107
72	Anschliffbilder der Probe von der oberen Kante des Austrittes; Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1.....	108
73	Anschliffbilder der Probe aus dem Übergangsbereich; Vergrößerung a – 40:1, b – 500:1.....	108
74	Einteilung der Ansatzschliffe in die Zonen a, b und c; 1 – Glockenoberfläche, 2 – Übergang.....	109
75	Anschliffbilder der kalten Zone der Probe; Vergrößerung a – 500:1, b – 3500:1.....	111
76	Anschliffbilder der mittleren Zone der Probe; Vergrößerung a – 500:1, b – 3500:1.....	112
77	Anschliffbilder der heißesten Zone der Probe; Vergrößerung a – 500:1, b – 3500:1.....	113
78	Übergang zwischen der mittleren und heißesten Zonen.....	113
79	Anschliffbild der Porenstruktur aus der heißesten Zone.....	113
80	Die mittlere Härte der Proben.....	116
81	Schematische Darstellung des Ofenmodells.....	122
82	Abscheidung der Nebelflüssigkeit am Austrittsbereich des Modells.....	122
83	Die Abscheidungen der Nebelflüssigkeit an der unteren Kante des Austrittes bei verschiedenen Gichtwindvolumina; a - 20 m <sup>3</sup> /h, b - 25 m <sup>3</sup> /h, c - 28 m <sup>3</sup> /h...	124
84	Entstehung und Ausbreitung der kondensierten Schicht bei 25 m <sup>3</sup> /h.....	125
85	Die Spuren der Tröpfchen der Nebelflüssigkeit; a -20m <sup>3</sup> /h, b – 25m <sup>3</sup> /h, c – 28 m <sup>3</sup> /h.....	126
86	Abscheidungen der Nebelflüssigkeit am Austrittsbereich; a – Gesamtansicht, b – Austrittsecke.....	127
87	Die Spuren der heruntergelaufenen Tröpfchen der Nebelflüssigkeit bei 25 m <sup>3</sup> /h..	128
88	Derzeitige und optimierte Einstellung der Gichtwinddüsen.....	132
89	Derzeitiger und optimierter Neigungswinkel der Gichtwinddüsen.....	133
90	Vergleich der prozentualen Zusammensetzung des Gichtgases.....	140

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
1 Masse des gebildeten Zinkoxides und Zinkverlustrate im IS-Ofen nach 160 h..	20
2 Problemrelevante Parameter bei Annahme eines isothermen Prozesses.....	27
3 Angaben zum Programmpaket.....	84
4 Die wichtigsten Reaktionen im Oberofen.....	85
5 Eingangsdaten für die Berechnung.....	85
6 Mittlere chemische Zusammensetzung der Proben.....	103
7 Chemische Zusammensetzung der Zonen a, b, c der von der Glockenoberfläche ausgebrochenen Probe.....	110
8 Ursachen der systematischen und zufälligen Fehler.....	130
9 Zunahme des Umsatzes in Abhängigkeit von der Häufigkeit der Putzschichten.....	135

## Symbolverzeichnis

$A$	Fläche des Schachtes	$\text{m}^2$
$c$	Schallgeschwindigkeit	$\text{m/s}$
$c_p$	Spezifische isobare Wärme	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$d$	Schachtquerschnitt	$\text{m}$
$f_o$	Frequenz des ausgesendeten Strahles	$\text{MHz}$
$f_E$	vom Empfänger aufgenommene Frequenz	$\text{MHz}$
$\Delta f_d$	Frequenzverschiebung	$\text{MHz}$
$I$	Impulsstrom	$\text{N}$
$L$	charakteristische Länge	$\text{m}$
$\dot{m}$	Massenstrom pro Quadratmeter	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
$\rho$	Dichte des bewegten Mediums	$\text{kg}/\text{m}^3$
$\Delta P$	Druckverlust	$\text{Pa}$
$\dot{q}_{Pb}$	Wärmestromdichte	$\text{W}/\text{m}^2$
$\dot{Q}_g$	Wärmestrom	$\text{W}$
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	$\text{K}$
$u$	Geschwindigkeit der aus dem Schacht aufsteigenden Gase	$\text{m/s}$
$u_G$	Geschwindigkeit des Gichtwindes	$\text{m/s}$
$U$	Volumen des Schachtes	$\text{m}^3$
$v$	Gichtwindvolumen	$\text{m}^3/\text{h}$
$v_{\perp}$	Geschwindigkeitskomponente	$\text{m/s}$
$V_0$	Volumen des Gases bei $0^\circ\text{C}$ (273 K) und 1 bar	$\text{m}^3$
$V$	Volumen des Gases bei der Arbeitstemperatur	$\text{m}^3$
$\Delta x$	Abstand der Interferenzflächen	$\text{mm}$
$\alpha$	Volumenausdehnungskoeffizient	$\text{Grad}^{-1}$
$\beta$	Position der Gichtwinddüsen	$^\circ$
$\gamma$	Neigung der Gichtwinddüsen	$^\circ$
$\lambda_o$	Wellenlänge des Laserlichtes	$\text{nm}$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$\nu$	Kinematische Viskosität des Gases	$\text{m}^2/\text{s}$
$\Theta$	Winkel zwischen den Laserstrahlen	$^\circ$

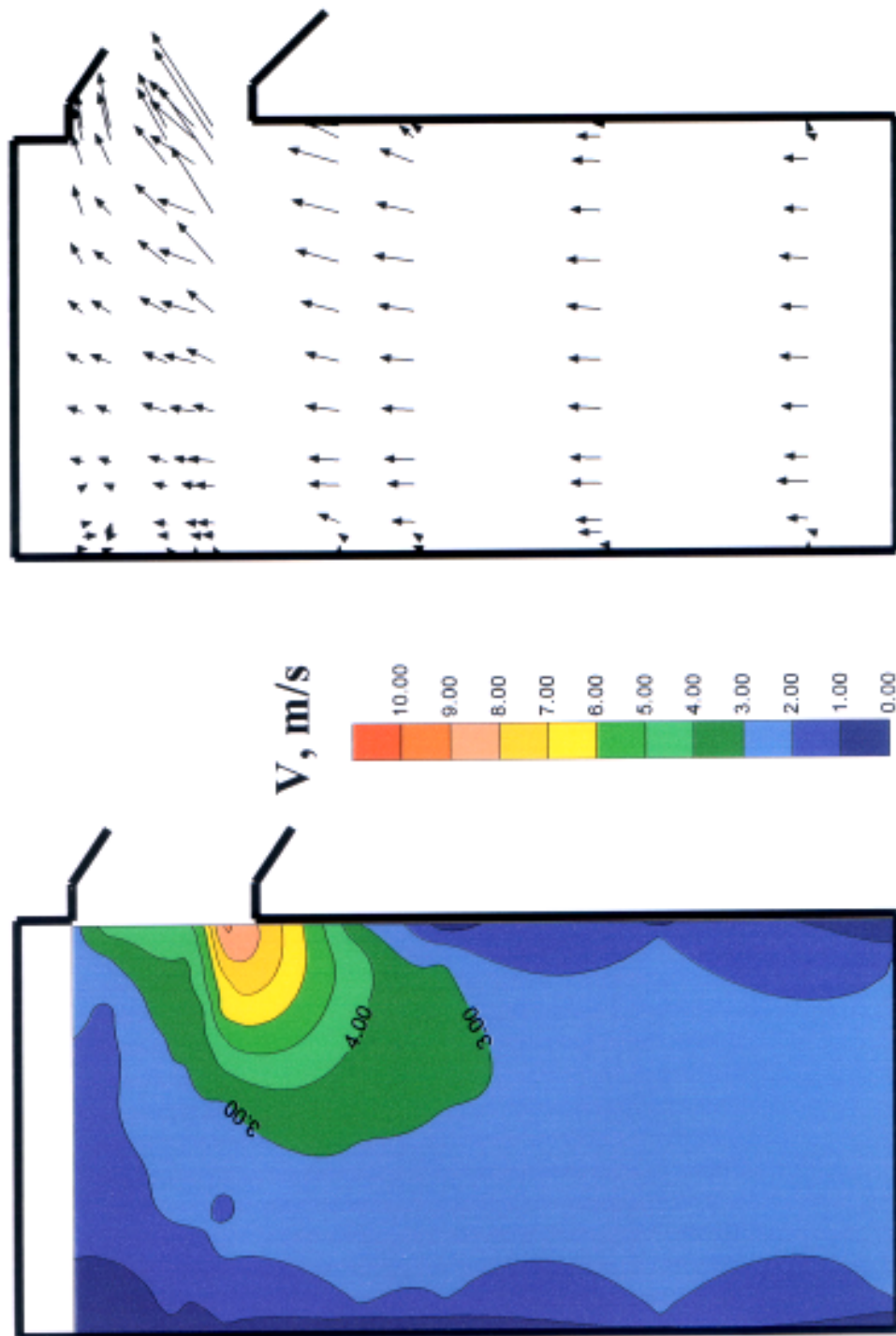
## **Ähnlichkeitskennzahlen**

Eu	Euler-Zahl
Nu	Nusselt-Zahl
Pr	Prandtl-Zahl
Re	Reynolds-Zahl

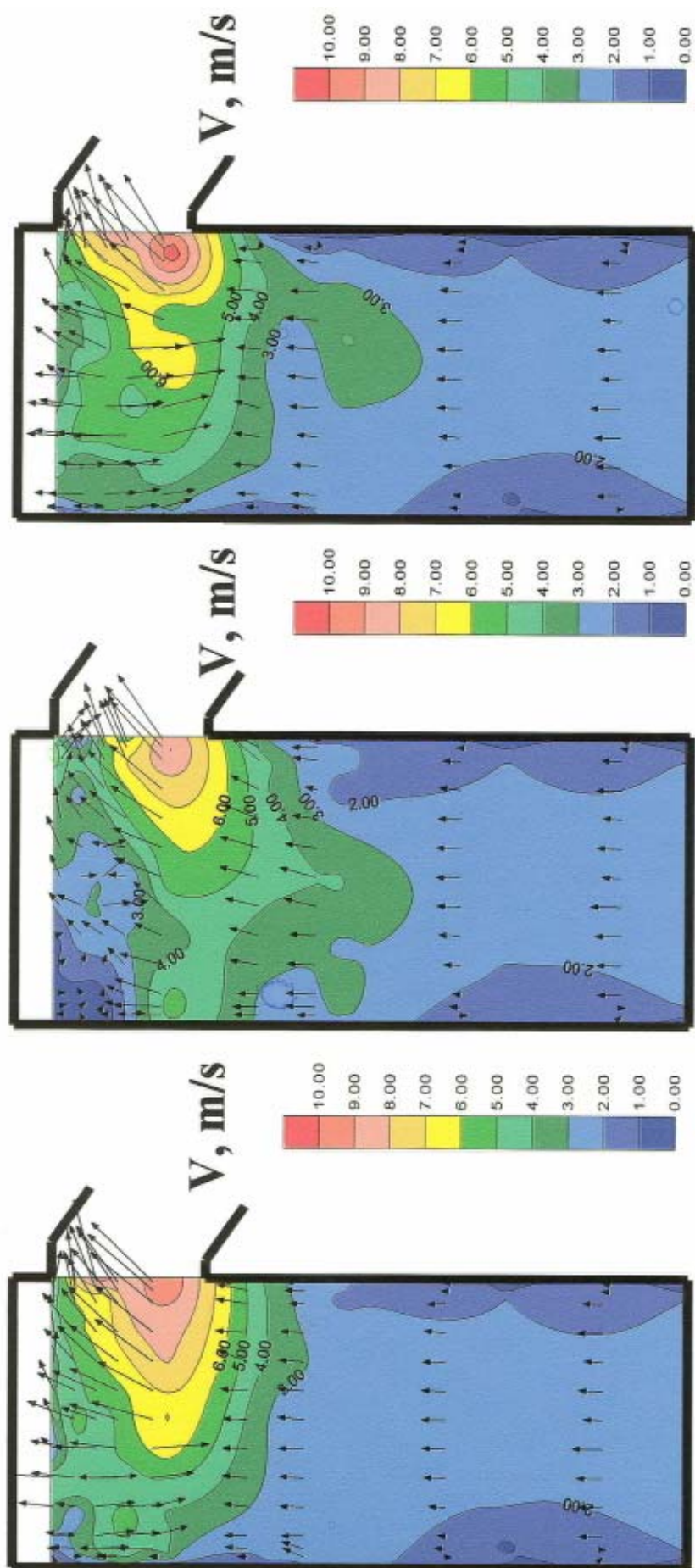
## **Indizes**

IS	Imperial Smelting
KTA	Konstant-Temperatur-Anemometer
LDA	Laser-Doppler-Anemometrie
MHD	M.I.M. Hüttenwerke Duisburg

## Anhang

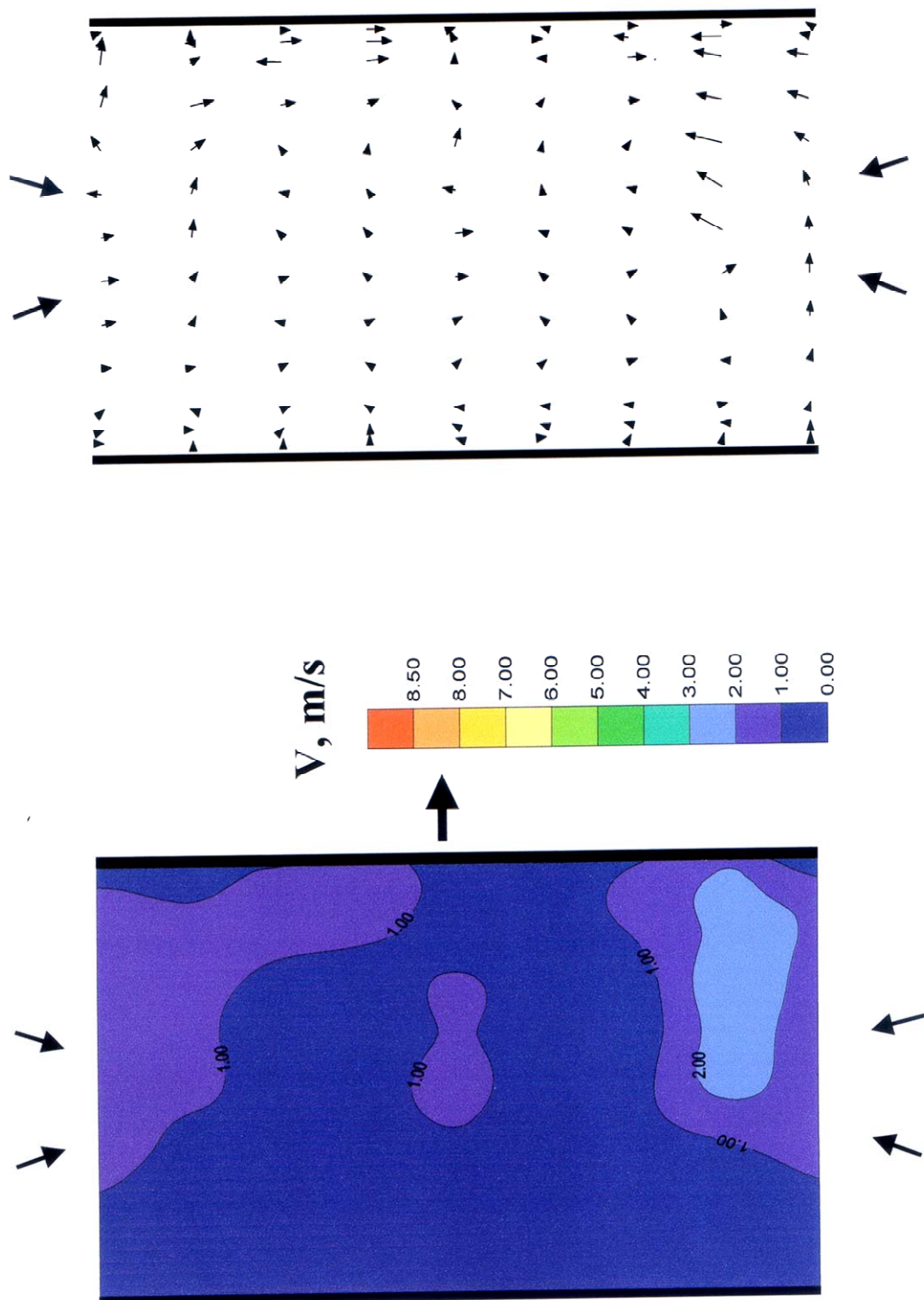


**Bild A 1:** Vertikale Strömungsprofile ohne Einblasen des Gichtwindes

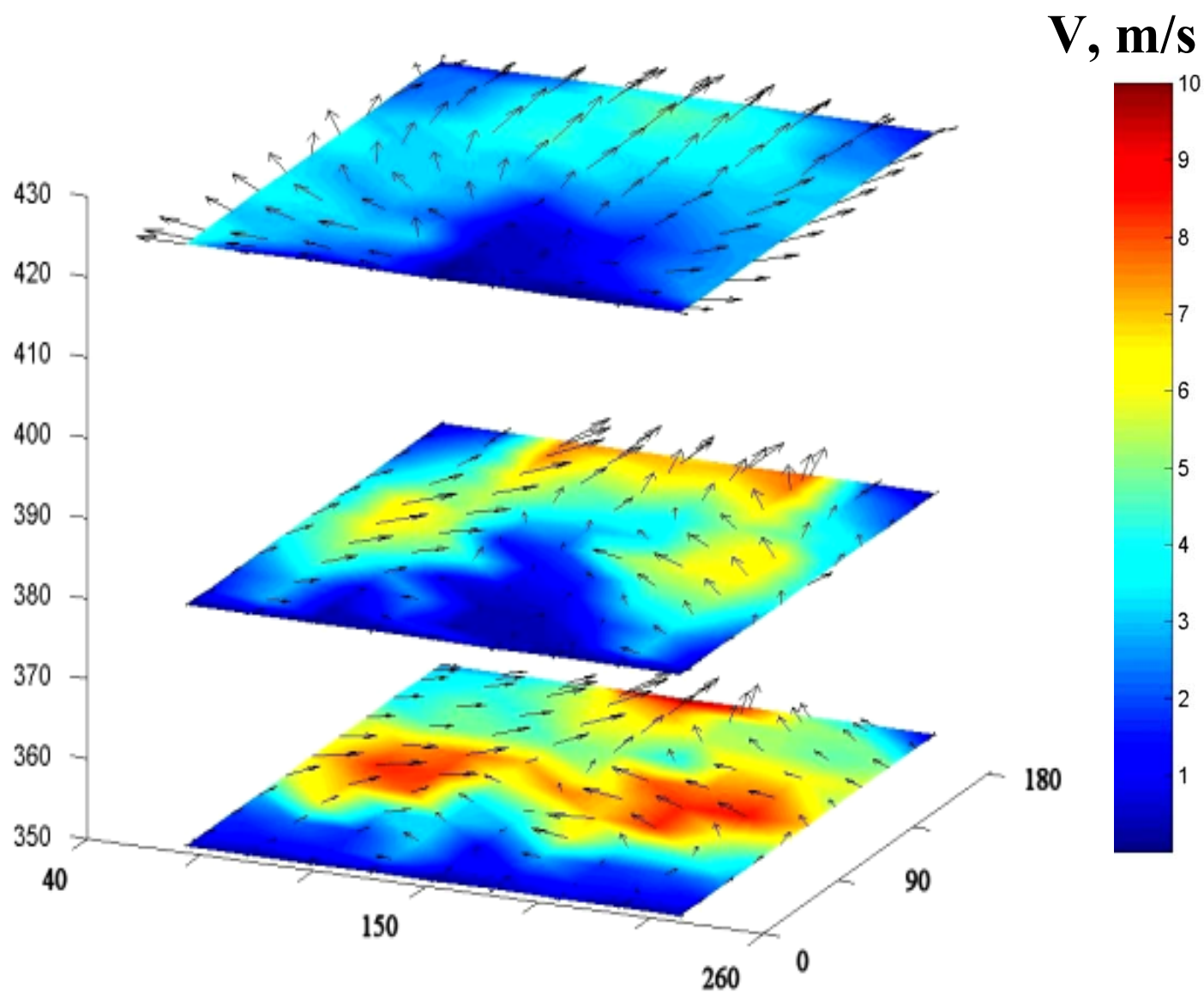


**Bild A 2:** Vertikales Strömungsprofil beim Einblasen der Luft in Richtung Kondensator

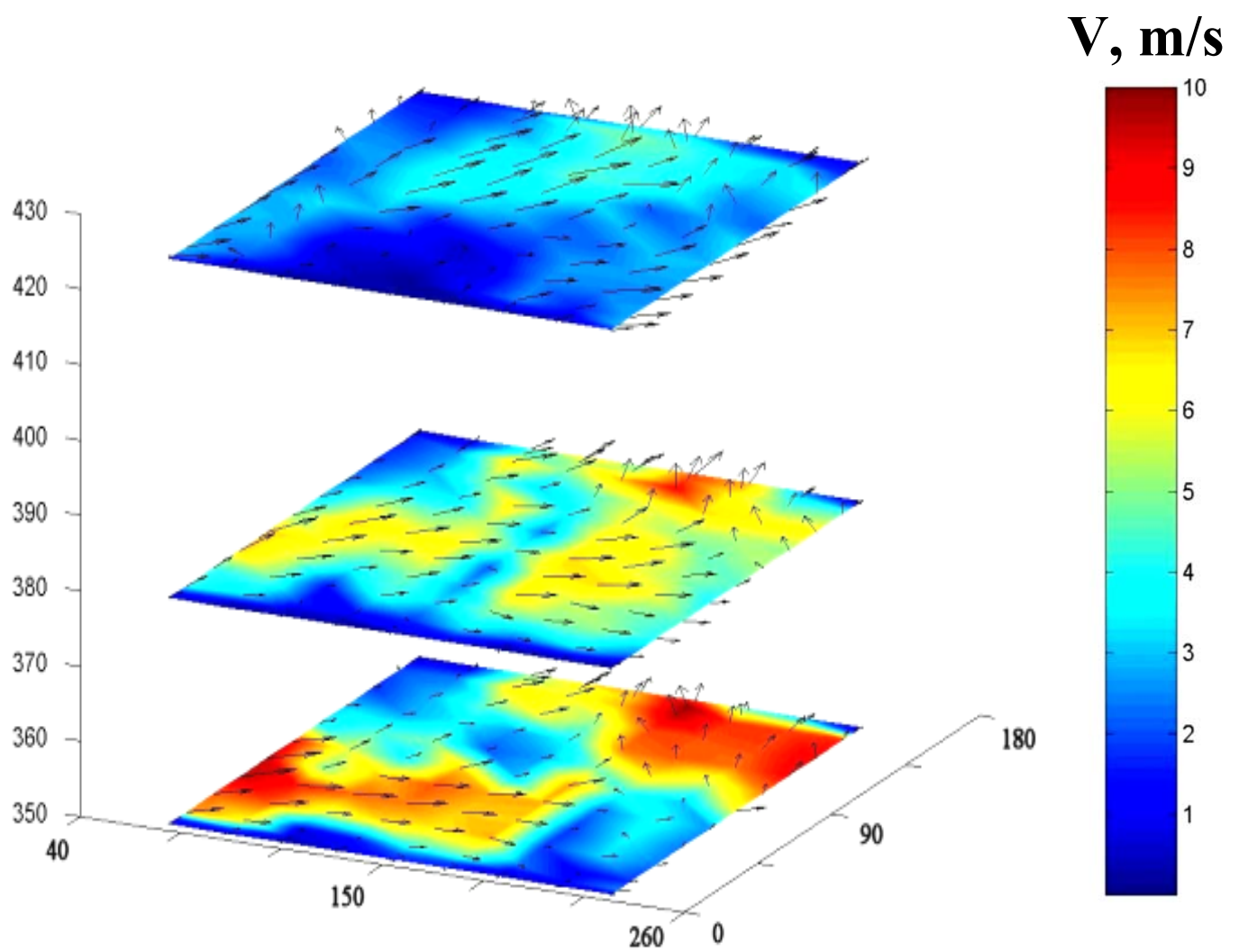




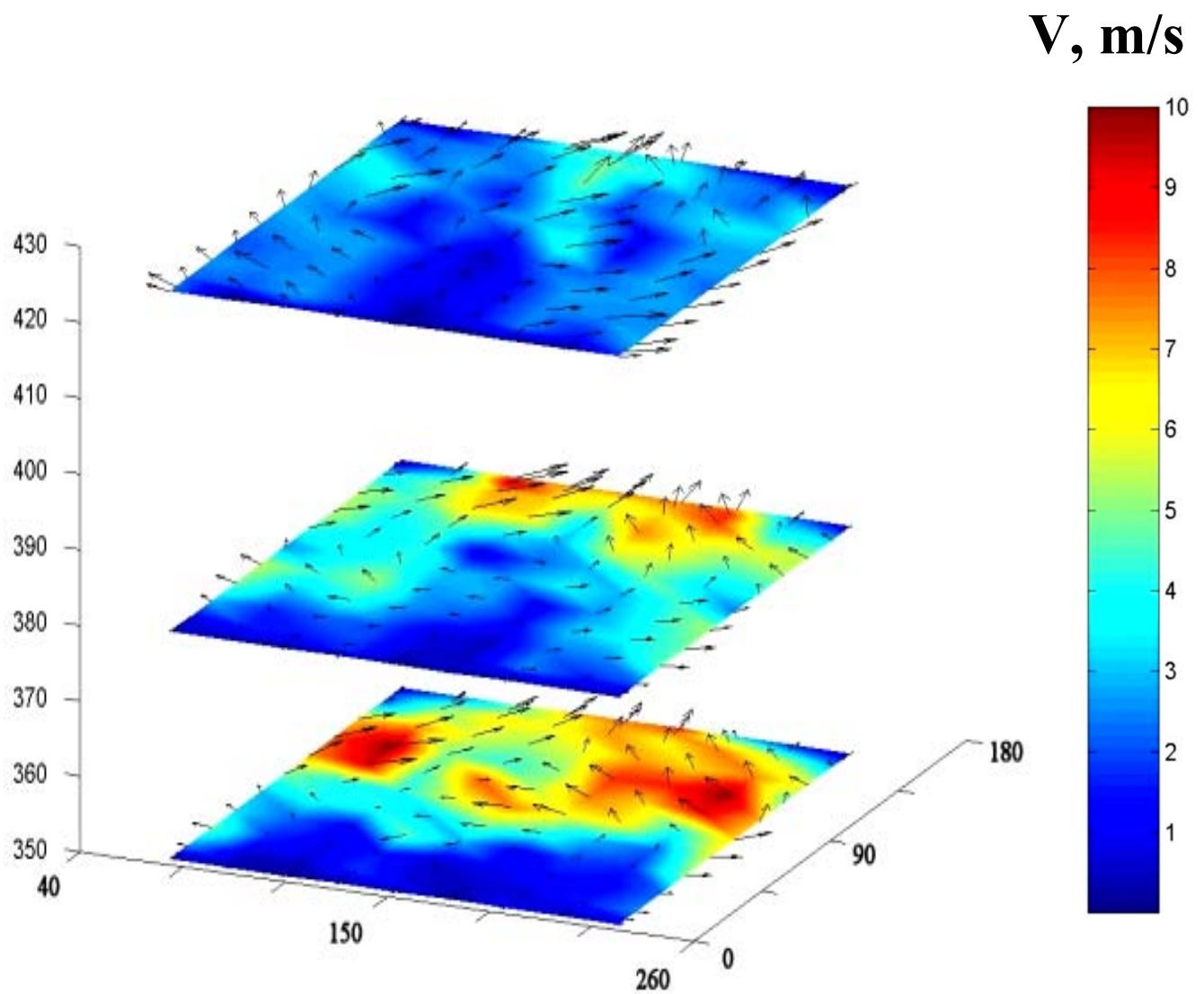
**Bild A 3:** Horizontales Strömungsprofil bei den unterschiedlichen Positionen der Düsen;  
Schnitt unter den Düsen, Sicht von oben;



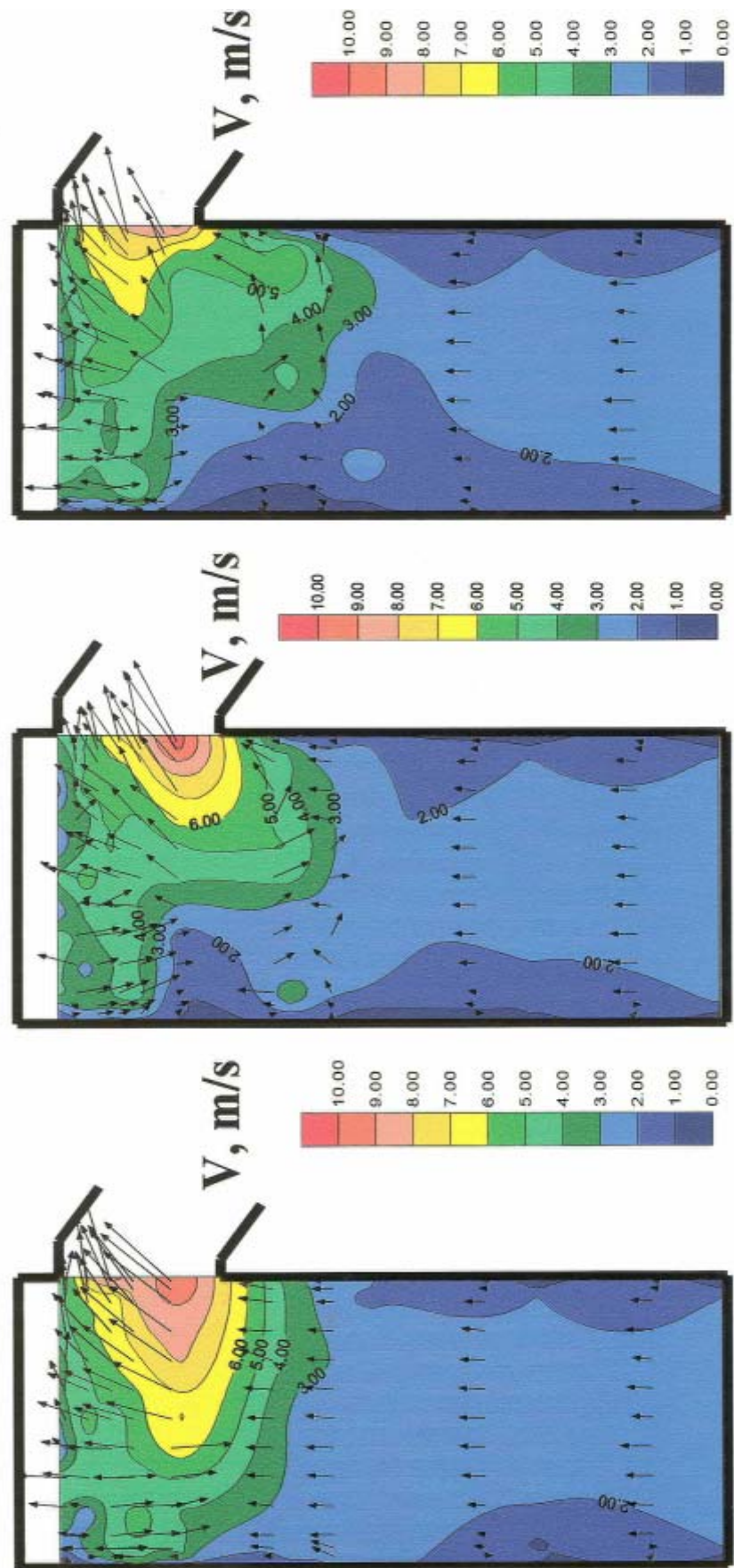
**Bild A 4:** Horizontale Strömungsprofile bei der symmetrischen Position der Düsen



**Bild A 5:** Horizontale Strömungsprofile bei der asymmetrischen Position der Düsen

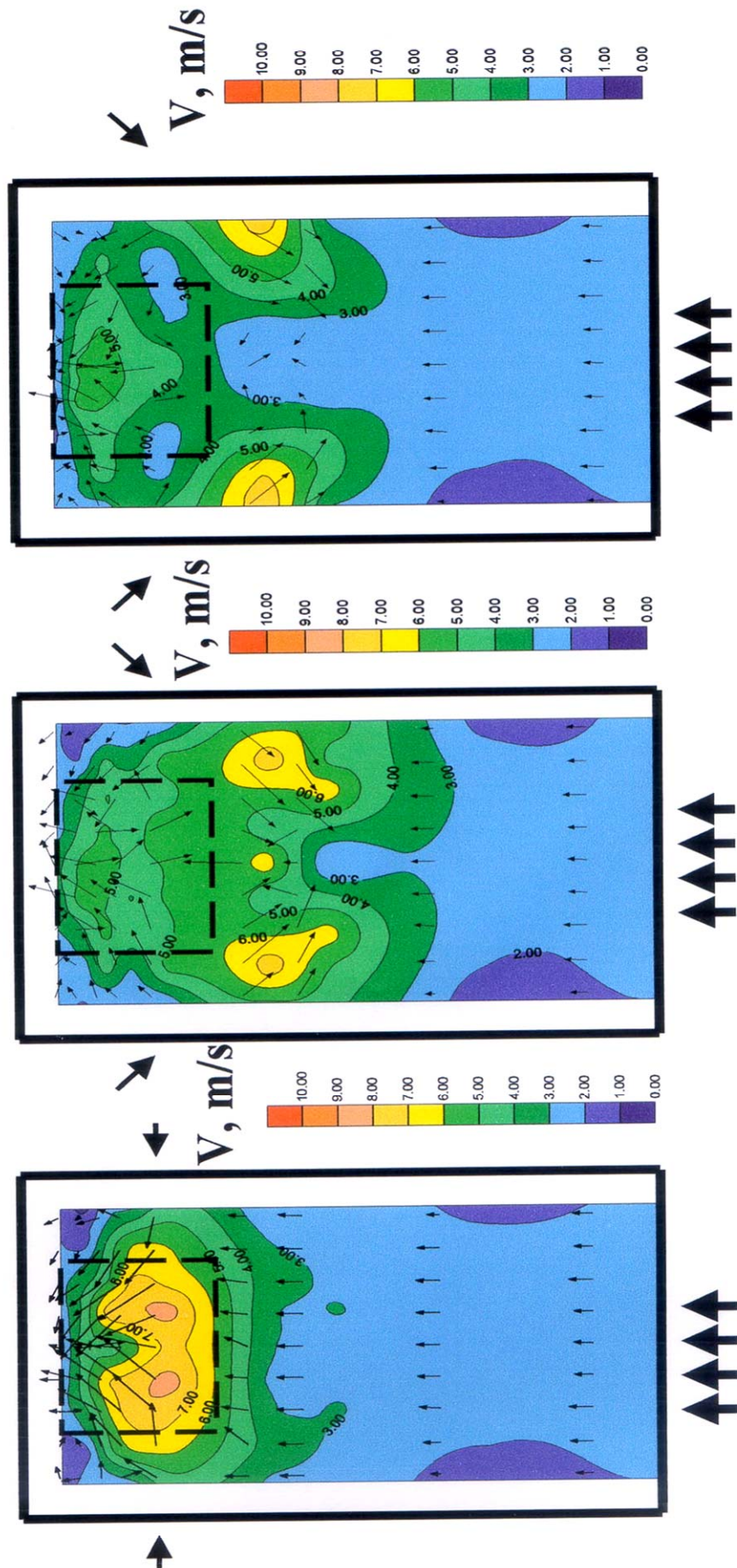


**Bild A 6:** Horizontale Strömungsprofile beim Einblasen der Luft in Richtung Kondensator

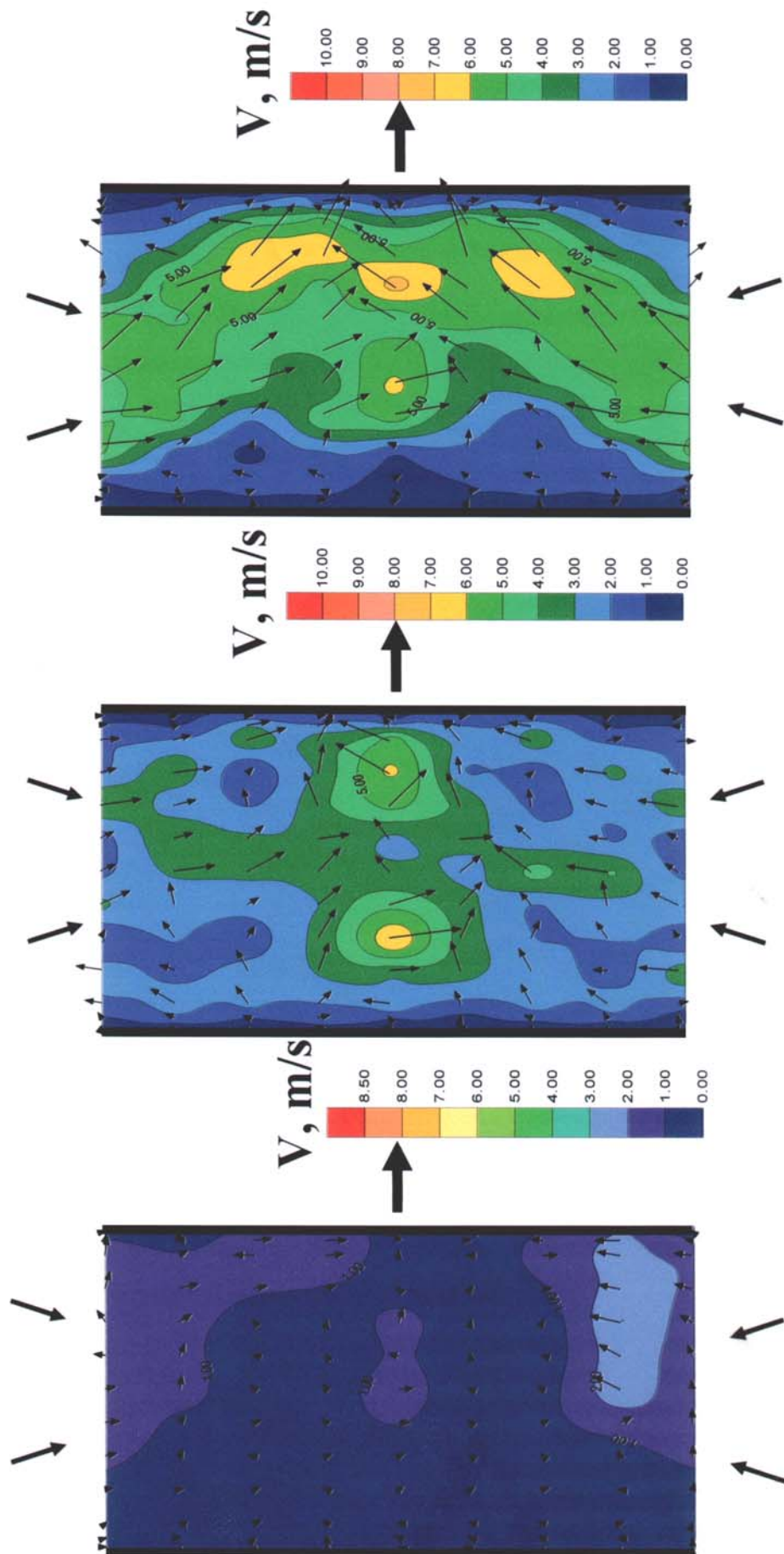


**Bild A 7:** Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Düsen

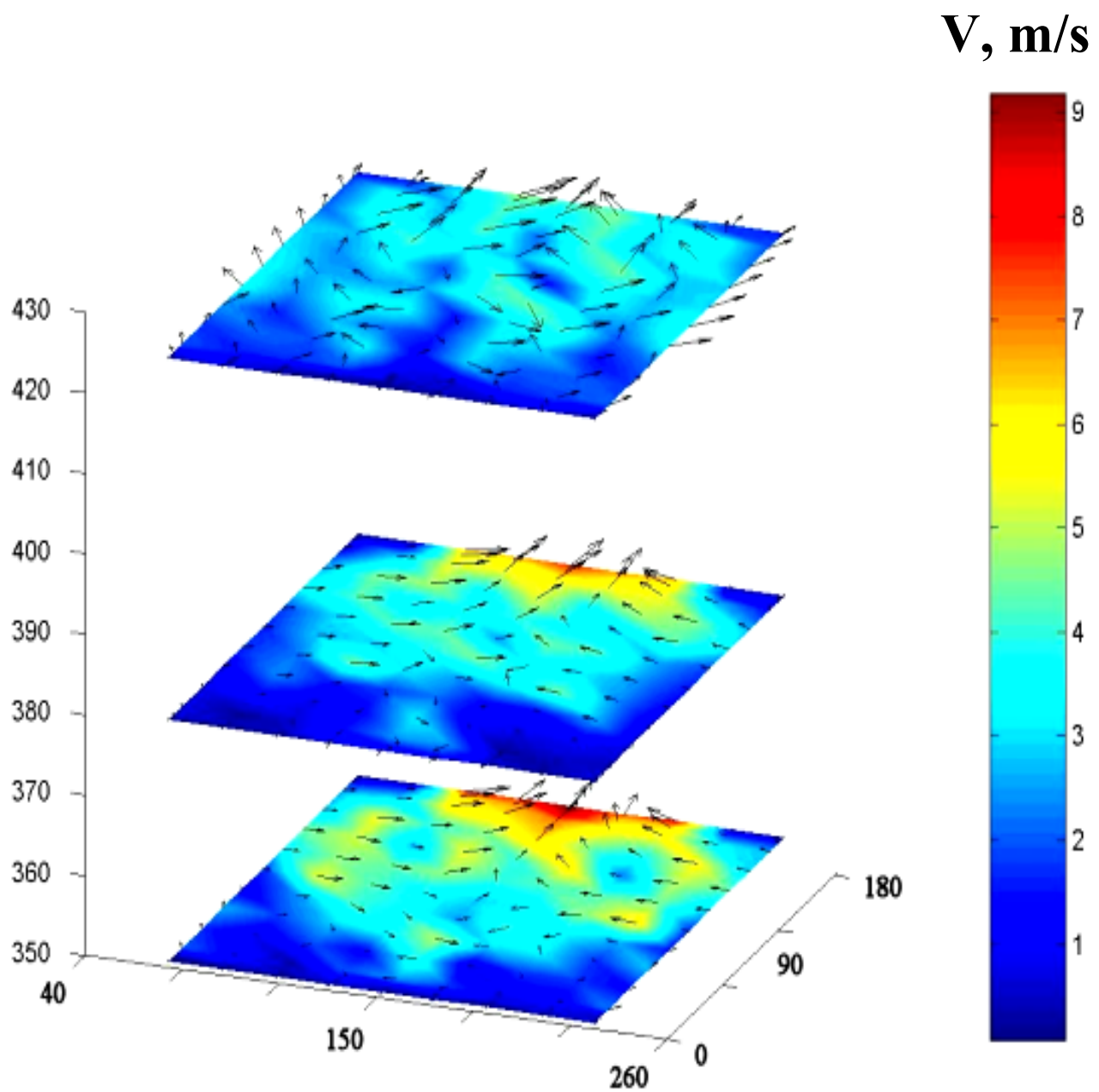




**Bild A 8:** Vertikale Strömungsprofile bei unterschiedlichen Neigungswinkeln der Düsen auf dem Schnitt parallel zum Austritt



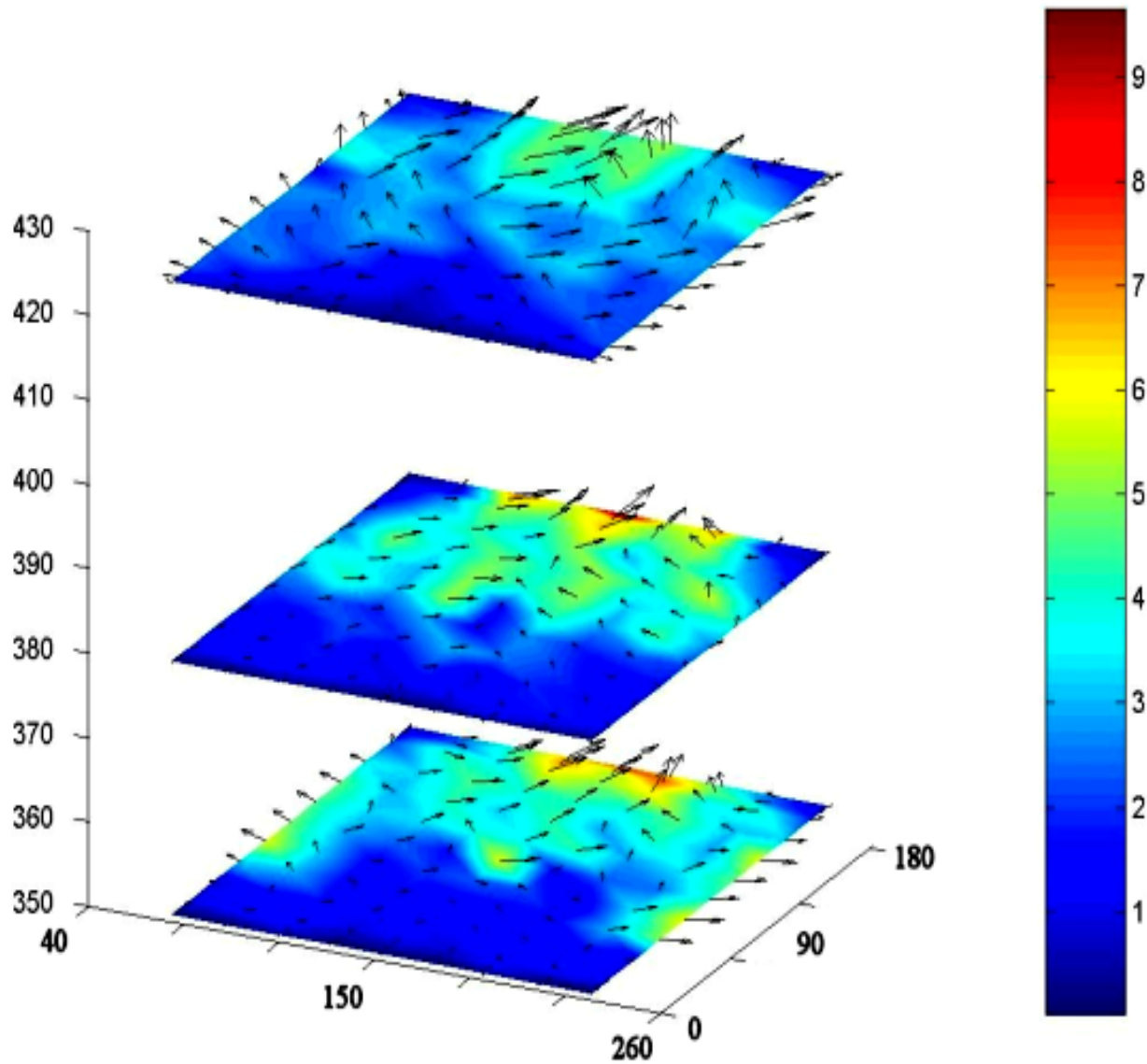
**Bild A 9:** Horizontale Strömungsprofile bei geneigten Einstellungen der Düsen; Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen;



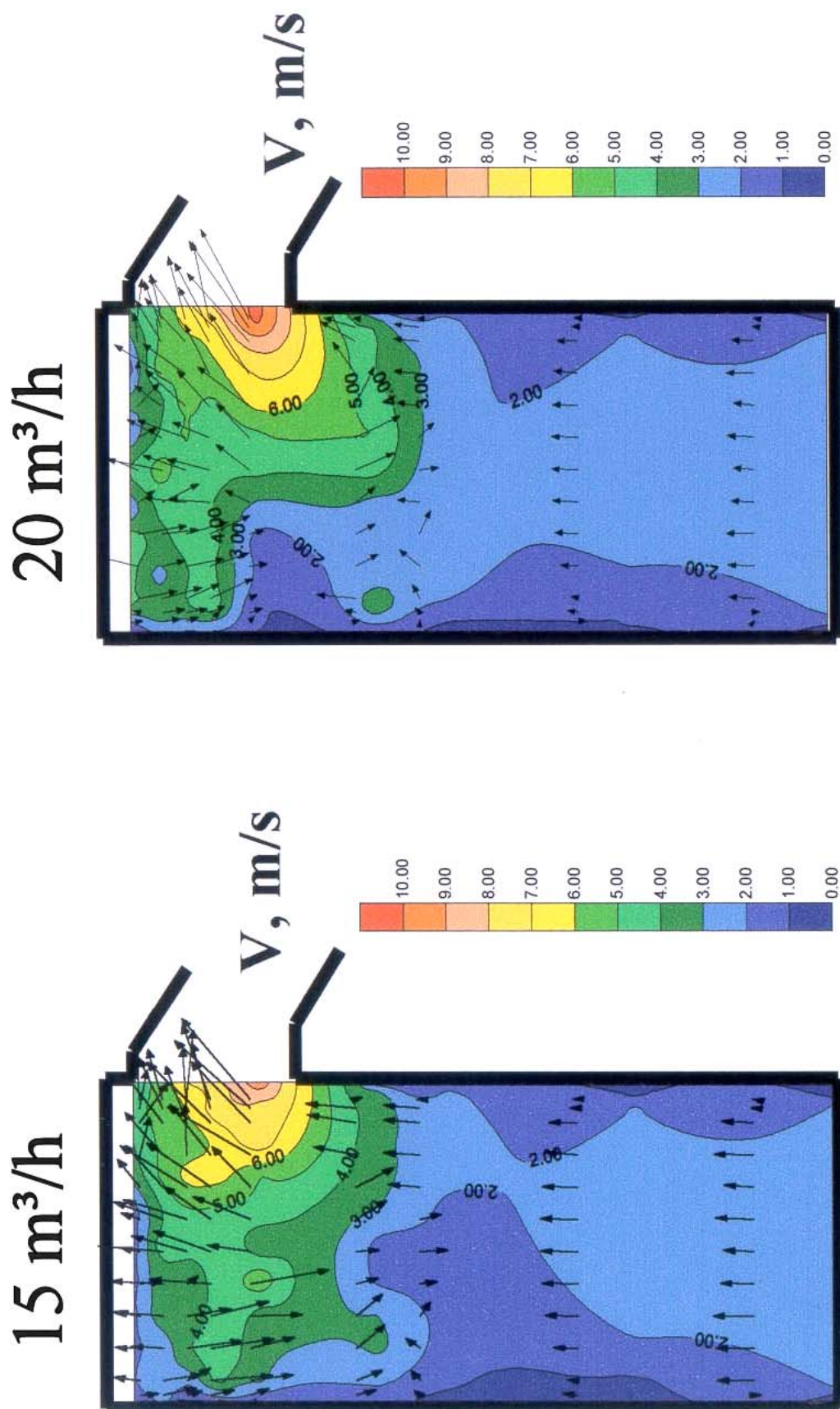
**Bild A 10:** Horizontale Strömungsprofile beim Neigungswinkel der Düsen von 10°



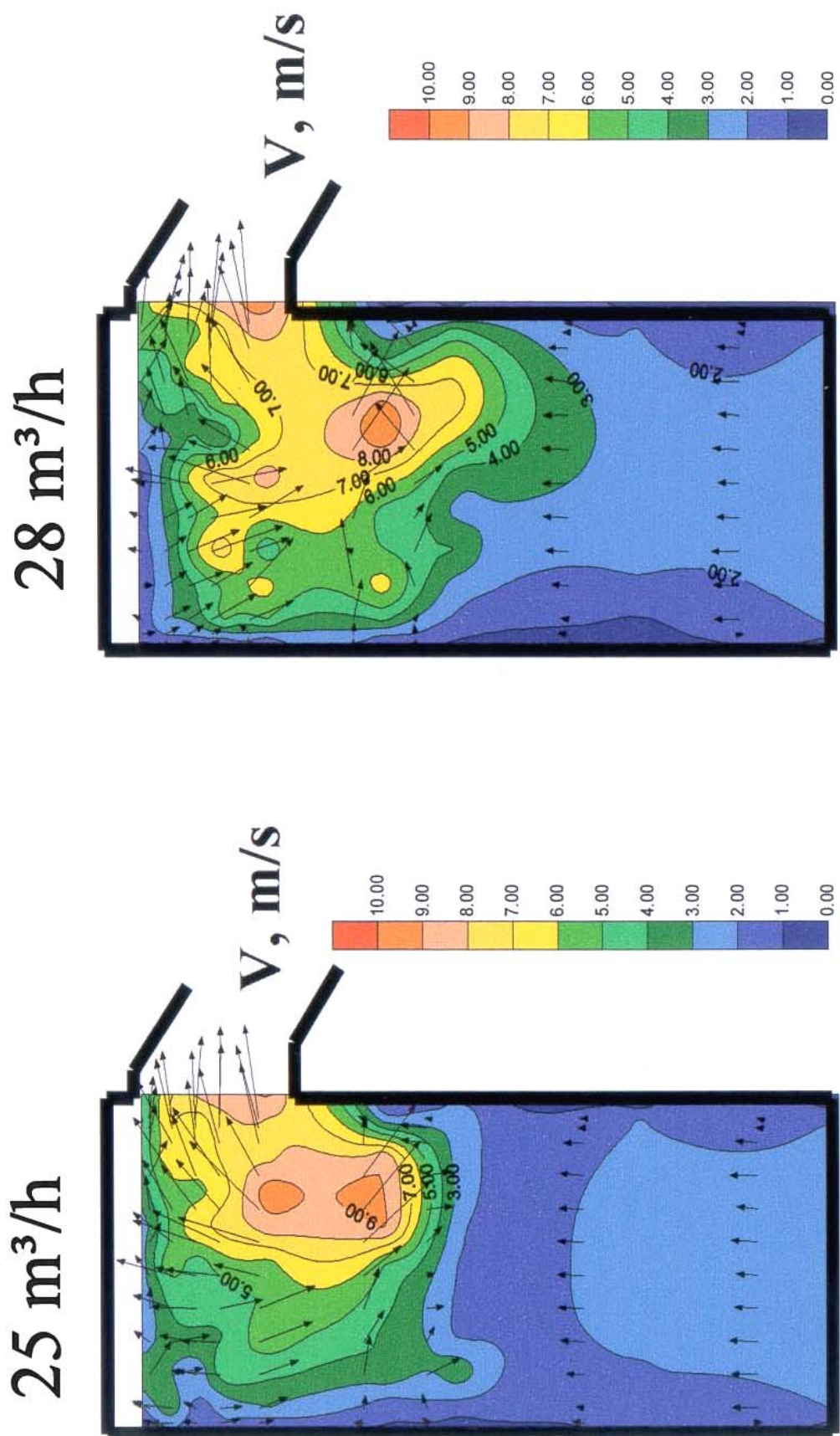
**V, m/s**



**Bild A 11:** Horizontale Strömungsprofile beim Neigungswinkel der Düsen von  $20^\circ$

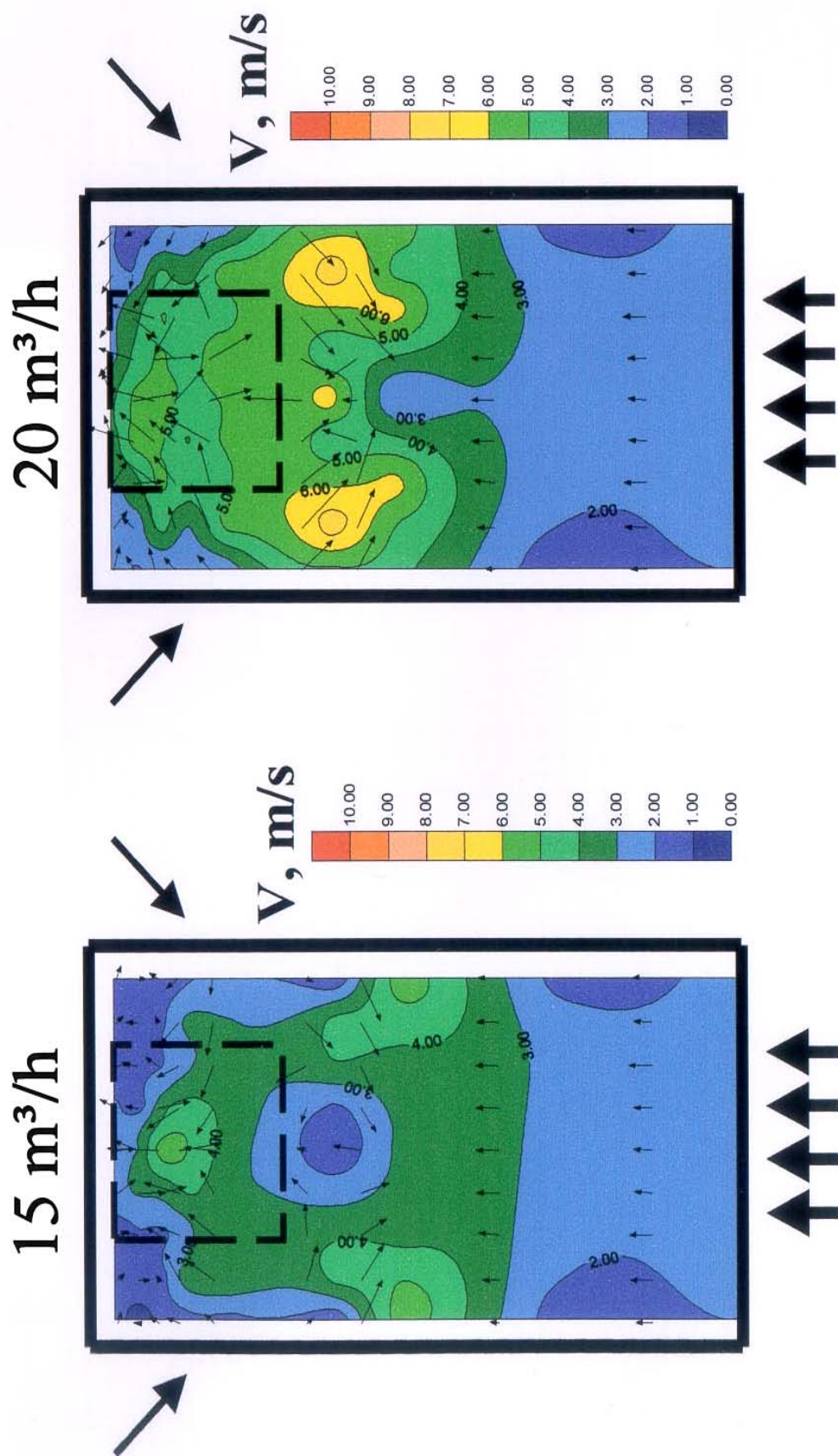


**Bild A 12:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina

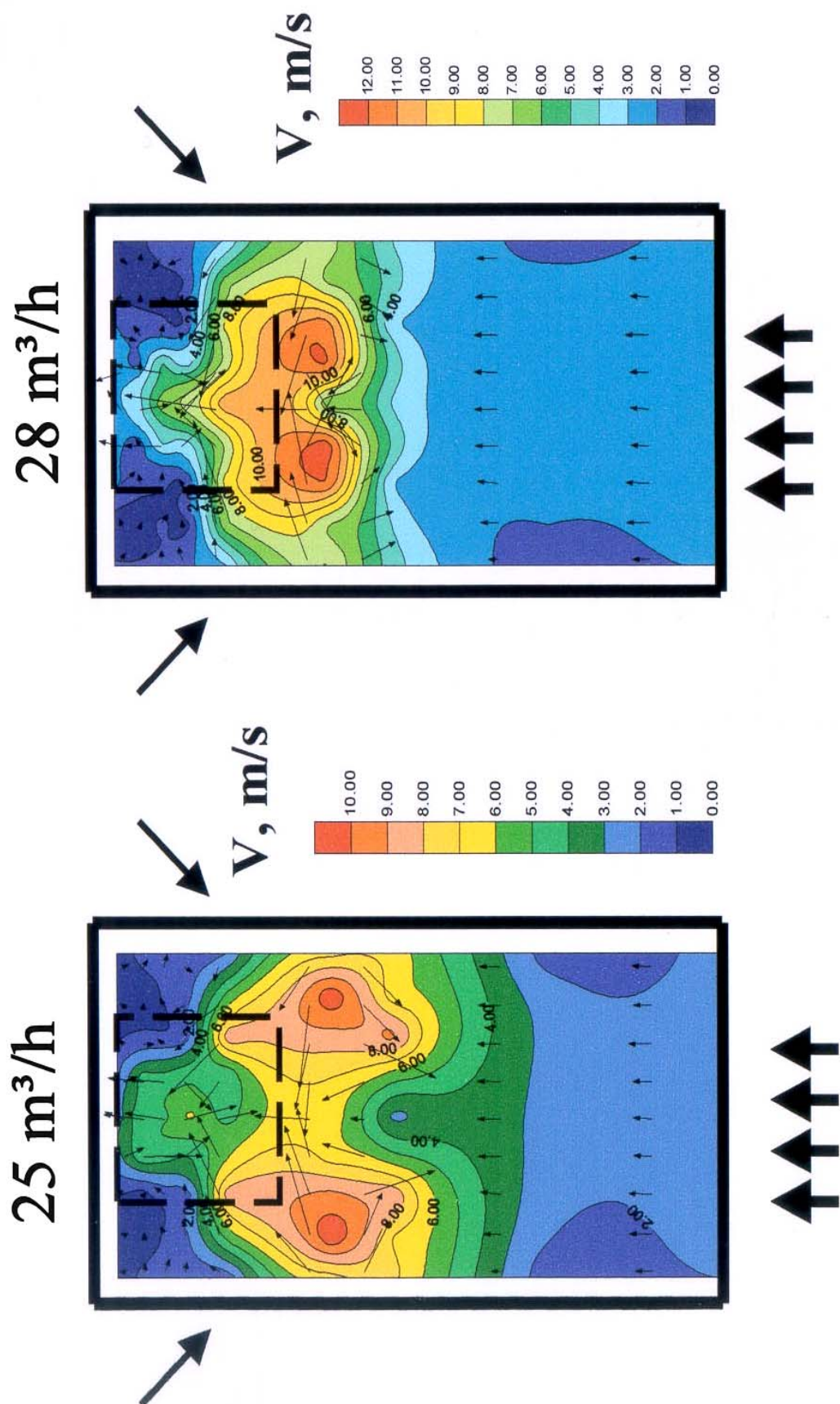


**Bild A 13:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina



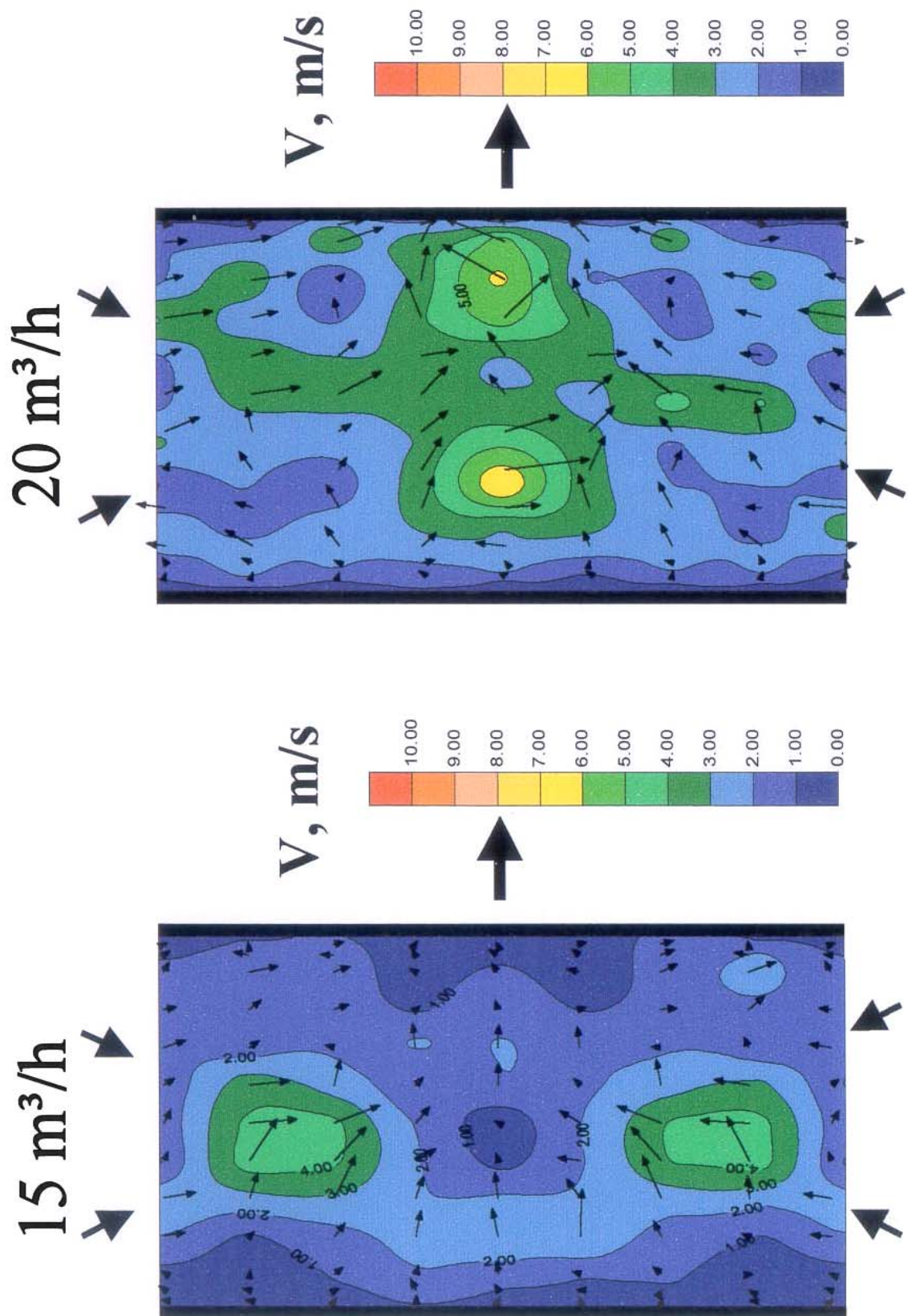


**Bild A 14:** Vertikale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina auf dem Schnitt parallel zum Austritt, Einblaswinkel 10°;

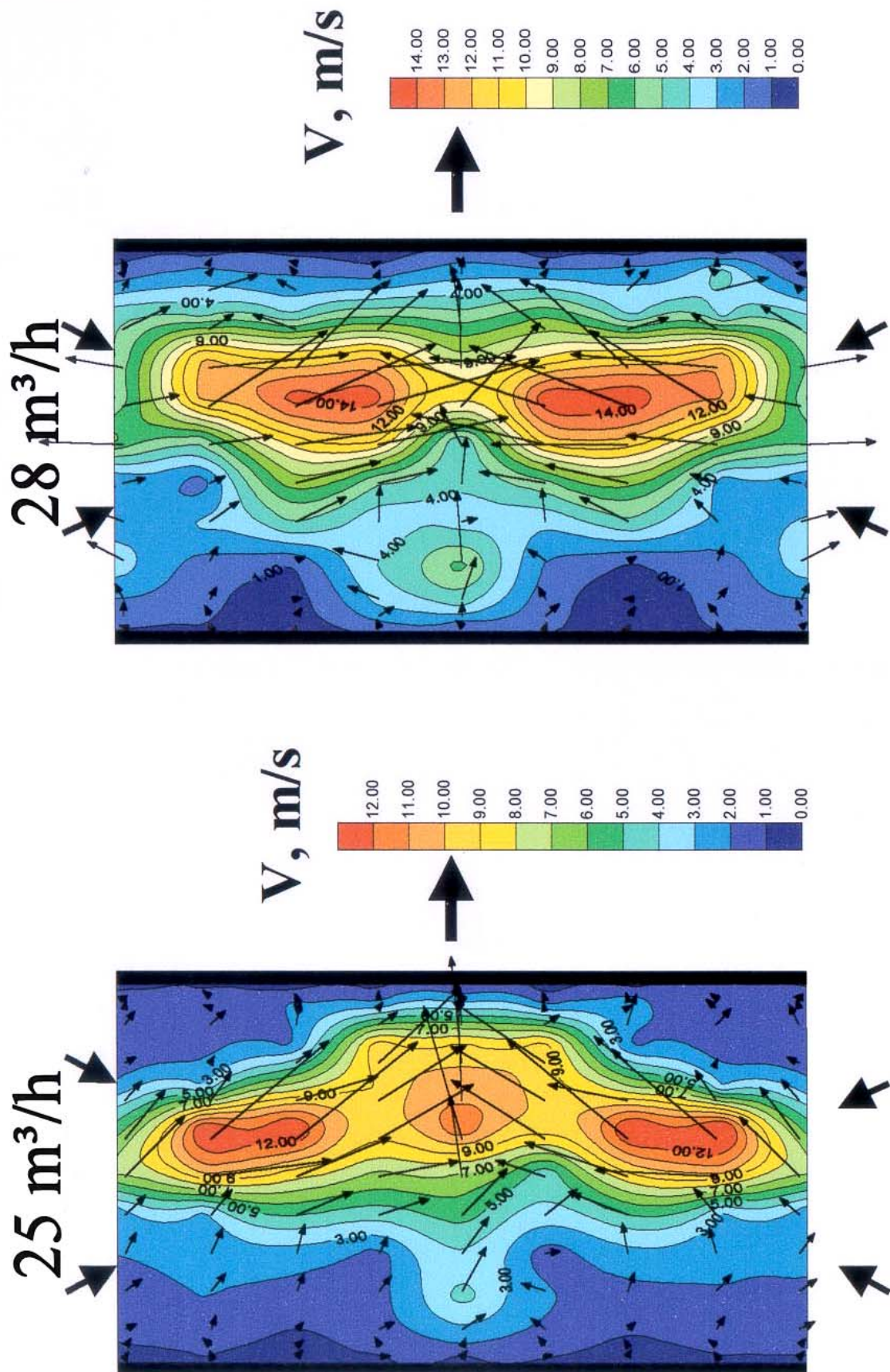


**Bild A 15:** Vertikale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina auf dem Schnitt parallel zum Austritt, Einblaswinkel  $10^\circ$ ;

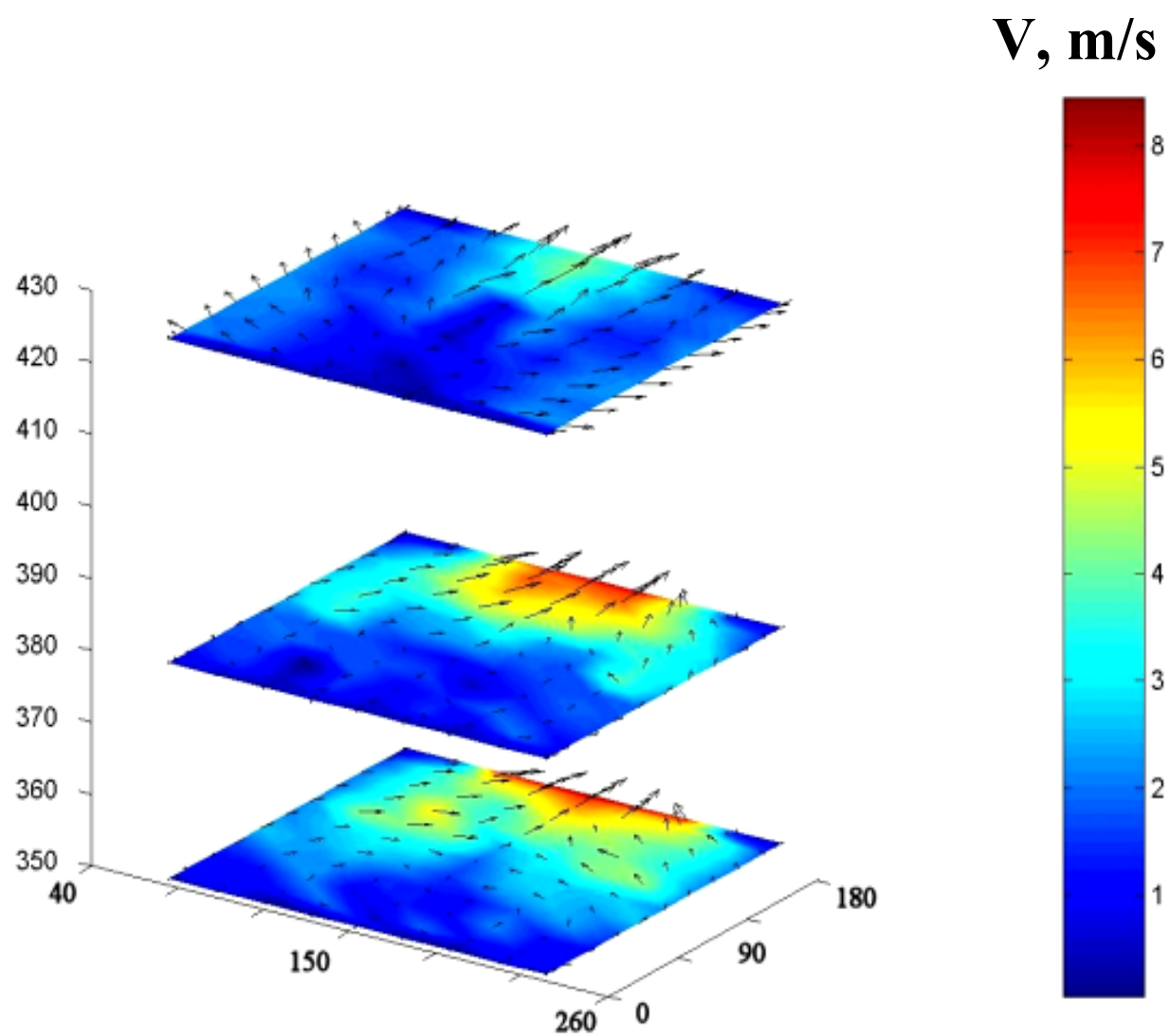




**Bild A 16:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina;  
Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen;

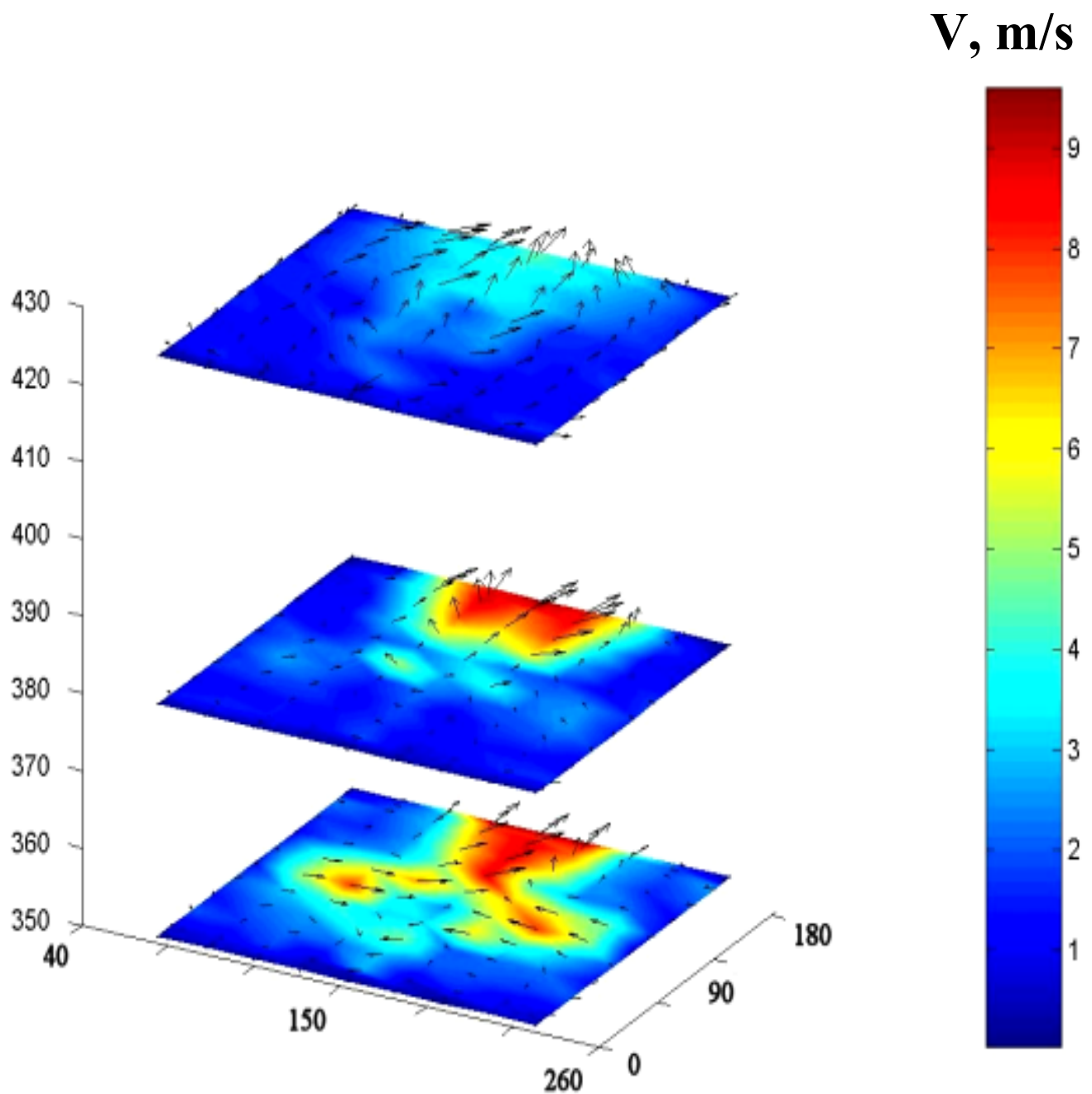


**Bild A 17:** Horizontale Strömungsprofile bei den unterschiedlichen Gichtwindvolumina;  
Sicht von oben, Schnitt unter den Düsen;



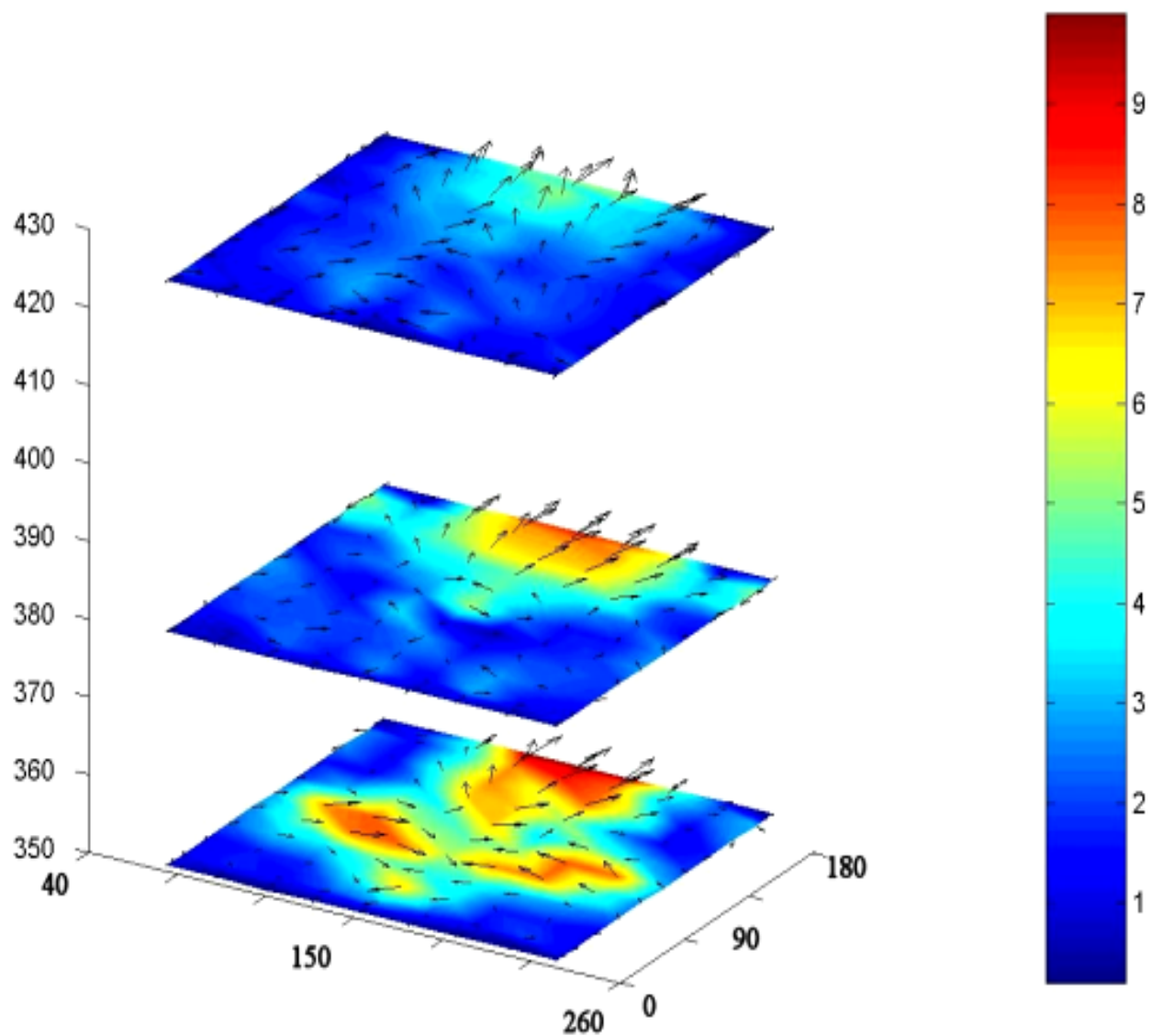
**Bild A 18:** Horizontale Strömungsprofile beim Gichtwindvolumen von 15 m<sup>3</sup>/h



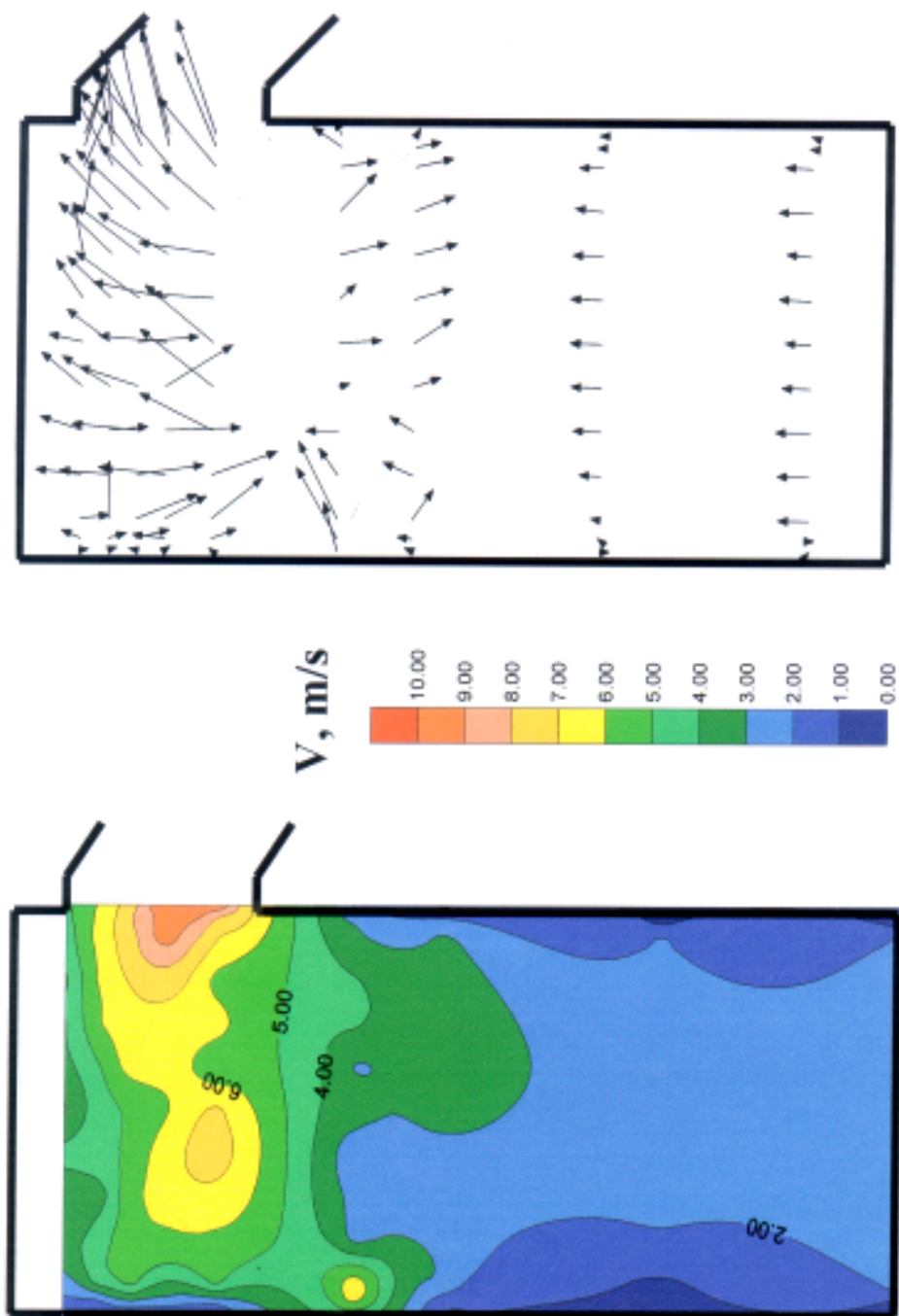


**Bild A 19:** Horizontale Strömungsprofile beim Gichtwindvolumen von 25 m<sup>3</sup>/h

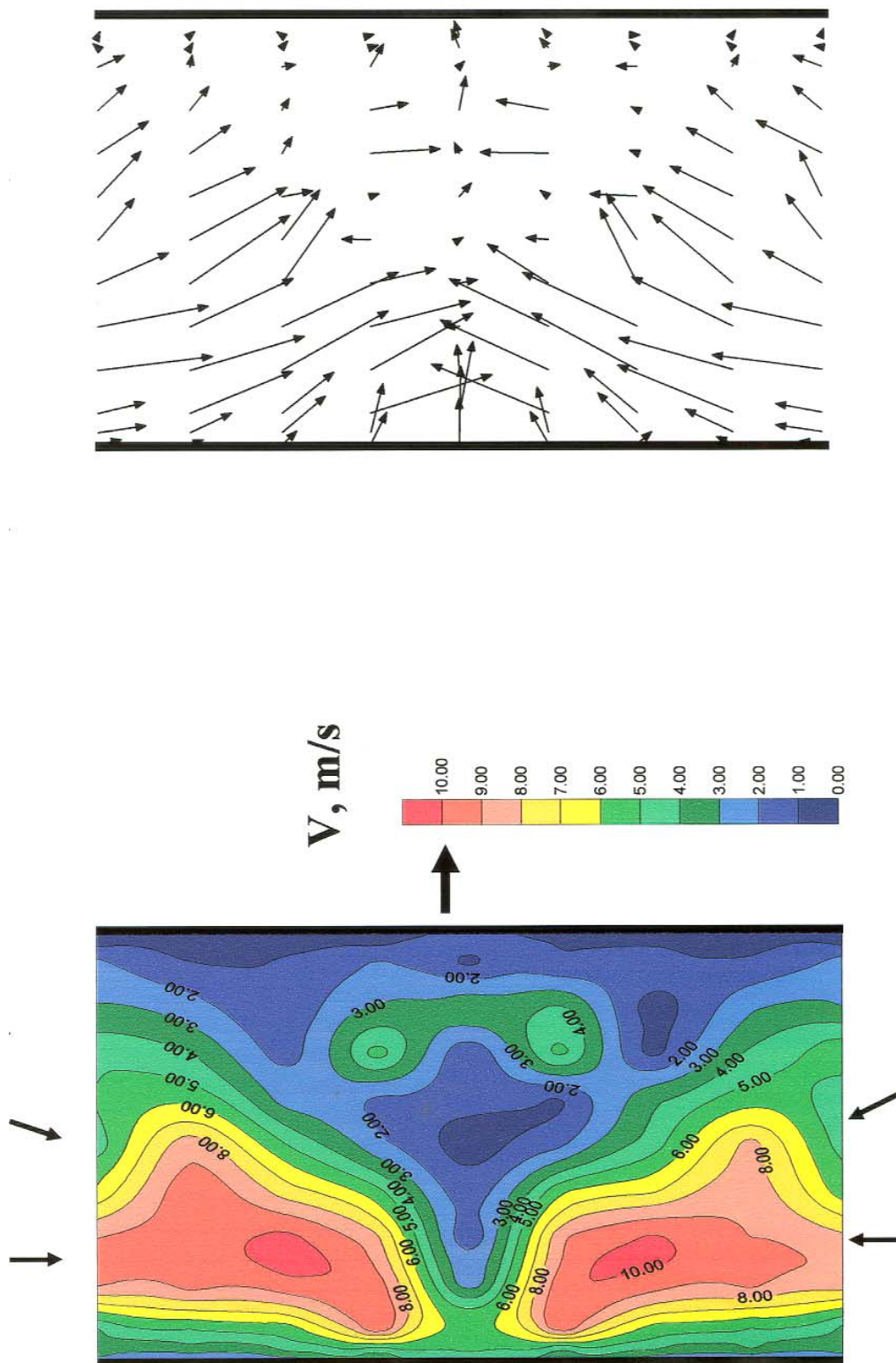
**V, m/s**



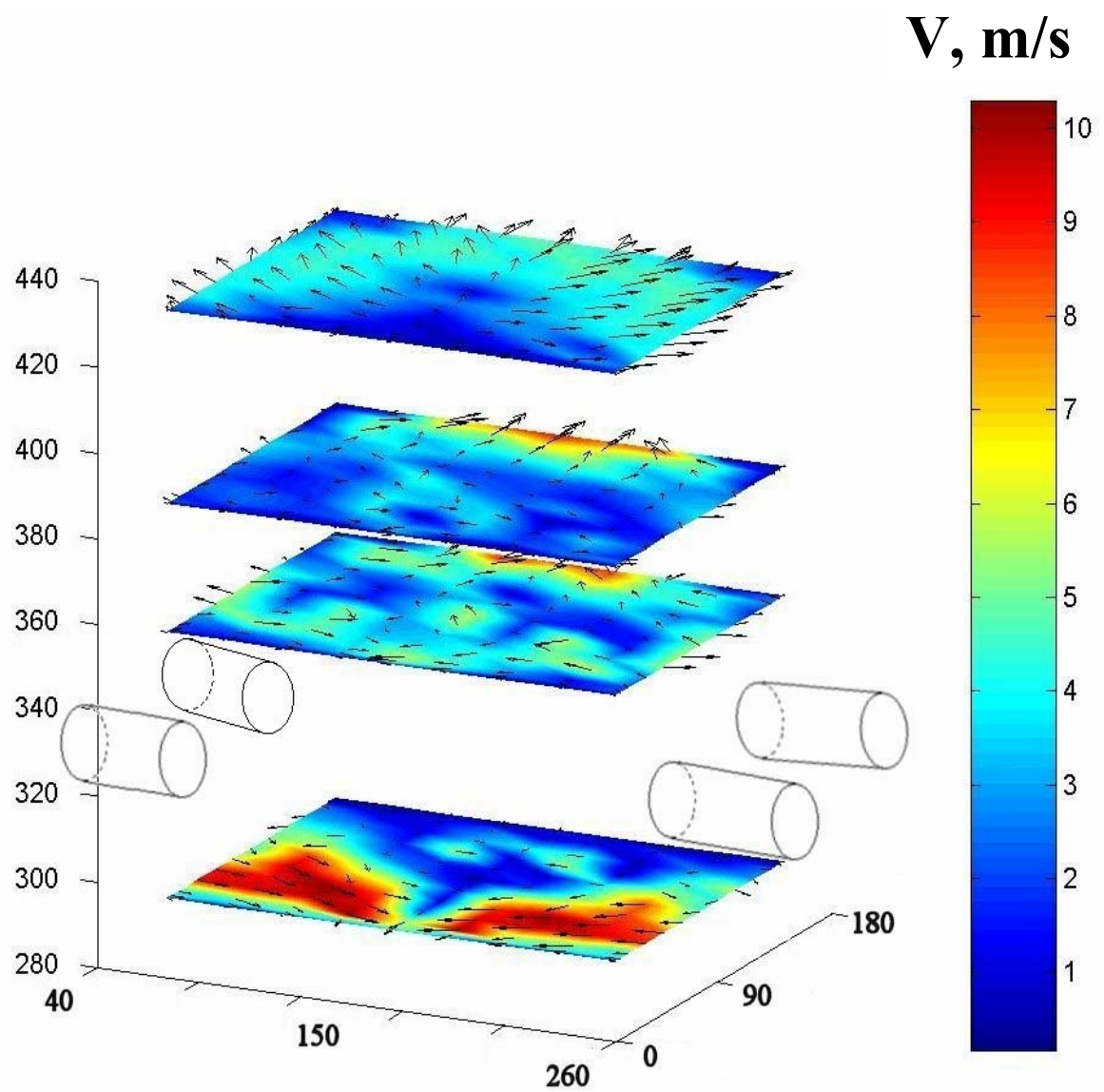
**Bild A 20:** Horizontale Strömungsprofile beim Gichtwindvolumen von 28 m<sup>3</sup>/h



**Bild A 21:** Strömungsbild beim Einblasen von Sekundärluft bei der kombinierten DüsenEinstellung senkrecht zum Austritt



**Bild A 22:** Strömungsbild bei der kombinierten Düseneinstellung; Sicht von oben, Schnitt unter den Gichtwinddüsen



**Bild A 23:** Horizontale Strömungsprofile bei der kombinierten Einstellung der Düse